Programa de Pós-Graduação em Geografia

Universidade Federal do Rio de Janeiro

MARIA LUCIA LORINI

ABORDAGEM HIERÁRQUICA E MULTIESCALAR PARA ANÁLISES DE DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA BIODIVERSIDADE: SISTEMAS QUATERNÁRIOS COSTEIROS DA MATA ATLÂNTICA COMO ESTUDOS DE CASO

Rio de Janeiro

2007

MARIA LUCIA LORINI

ABORDAGEM HIERÁRQUICA E MULTIESCALAR PARA ANÁLISES DE DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA BIODIVERSIDADE: SISTEMAS QUATERNÁRIOS COSTEIROS DA MATA ATLÂNTICA COMO ESTUDOS DE CASO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientadora: Profa. Dra. Irene Garay
Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Xavier da Silva

Rio de Janeiro
2007

Lorini, Maria Lucia
Abordagem hierárquica e multiescalar para análises de distribuição geográfica da biodiversidade: sistemas quaternários costeiros da Mata Atlântica como estudos de caso / Maria Lucia Lorini. - Rio de Janeiro, 2007.

xxvi, 479 f.: il.

Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2007.

Orientadora: Irene Garay
Co-orientador: Jorge Xavier da Silva

1.Escala, Hierarquia e Complexidade. 2.Distribuição Geográfica
4.Biodiversidade 5.Quaternário costeiro 6.Mata Atlântica
7.Sistemas vegetacionais 8.*Leontopithecus caissara*
9. SIG, GIS, Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto

Teses I. Garay, Irene. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Abordagem hierárquica e multiescalar para análises de distribuição geográfica da biodiversidade: sistemas quaternários costeiros da Mata Atlântica como estudos de caso.

Maria Lucia Lorini

ABORDAGEM HIERÁRQUICA E MULTIESCALAR PARA ANÁLISES DE DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA BIODIVERSIDADE: SISTEMAS QUATERNÁRIOS COSTEIROS DA MATA ATLÂNTICA COMO ESTUDOS DE CASO

Rio de Janeiro, 30 de maio de 2007.

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Aprovada por:

_____

Presidente, Profa. Dra. Irene Garay, Instituto de Biologia, UFRJ (Orientadora)

_____

Prof. Dr. Jorge Xavier da Silva, Instituto de Geociências, UFRJ (Co-orientador)

_____

Prof. Dr. Rui Cerqueira Silva, Instituto de Biologia, UFRJ

_____

Prof. Dr. Ricardo Valcarcel, Instituto de Florestas, UFRRJ

_____

Profa. Dra. Maria Fernanda Santos Quintela, Instituto de Biologia, UFRJ

_____

Prof. Dr. Evaristo de Castro Júnior, Instituto de Geociências, UFRJ

Dedicado a

Helena Gröbe Lorini

e Cândido Lorini
In memorian

Pessoas incríveis que eu tive a fortuna de ter como pais,
que apesar de tantas dificuldades na vida
sempre se fizeram vento, bússola e farol,
para me permitir navegar
e expandir os limites do mapa.

Vanessa Guerra Persson,

Minha “irmã”, parceira de tantas jornadas,
para que esta tese também seja dela.

AGRADECIMENTOS

"On ne reçoit pas la sagesse. Il fault la découvrir soi-même,
aprés um trajet que personne ne peut faire pour nous,
ne peut nous épargner"

Marcel Proust

Na impossibilidade de agradecer nominalmente a cada pessoa que me prestou auxílio para que fosse possível a elaboração deste trabalho, apresento de forma coletiva o meu apreço e devido reconhecimento a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram com o seu saber, dedicação, informação, trabalho e conforto. No entanto, cabe-me destacar desta lista algumas pessoas físicas e jurídicas:

Em primeiro lugar, agradeço à minha orientadora Dra. Irene Ester Gonzalez Garay, que me recebeu com muito carinho, estimulando minhas primeiras incursões pela temática da biodiversidade. Sem dúvida nossa convivência e troca de idéias foram responsáveis pela incorporação deste tema de maneira definitiva em minha formação e atuação profissional, bem como pela transformação daquelas primeiras incursões em trajetórias mais sólidas e duradouras. Muitos destes caminhos agora trilhamos juntas. À amiga Irene, agradeço pelas inúmeras vezes em que partilhamos impressões e reflexões sobre questionamentos profissionais e pessoais, as quais foram muito importantes para mim em momentos críticos e decisivos.

Ao Dr. Jorge Xavier da Silva, meu co-orientador neste doutorado, agradeço pelo grande aprendizado que desfrutei em sua companhia desde que me acolheu como orientador de mestrado, em um momento difícil, bem como por ter me iniciado no universo da Geografia e do Geoprocessamento e por ter me ensinado, de fato, a "pensar espacialmente".

Ao Dr. Wilson José de Oliveira, meu supervisor de doutorado, por ter confiado em minha proposta de estudo ao me aceitar no programa de bolsas de doutorado da Universidade Petrobras, bem como pela grande gentileza e consideração com que sempre atendeu as minhas demandas.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Petrobras pela bolsa de doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico (CNPq), ao Conservation International (CI), à Fundação Boticário de Proteção à Natureza, ao Lion

Tamarins of Brazil Fund (LTBF), à Petrobras e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFRJ, pelo suporte a parte das atividades de campo executadas neste projeto.

Ao Dr. Rodolfo José Ângulo (Dep. Geologia, UFPR) pelo estímulo, apoio e valiosa orientação sobre os aspectos geológicos/geomorfológicos e de mapeamento da distribuição de terrenos quaternários costeiros. À Dra. Maria Cristina de Souza (Dep. Geologia, UFPR), Dr. Rodolfo José Ângulo e Dr. Kenitiro Suguio (Dep. Geologia Sedimentar e Ambiental, USP) pela cessão de material bibliográfico e mapas geológicos do quaternário costeiro, respectivamente, do norte de Santa Catarina, do Paraná e do sul de São Paulo.

Ao Dr. Gustavo Ribas Curcio (Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, Embrapa) pela orientação sobre os tipos de solos e seus ambientes, bem como pela cessão dos mapas de solo do litoral do Paraná.

À Dra. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE) pela cessão de imagens de satélite da região entre o norte de SC e o sul de SP.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pela cessão de materiais cartográficos relativos à Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo.

Ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP) pelo acesso a unidades de conservação do litoral paranaense e pela cessão de materiais cartográficos referentes aos limites de UCs, bem como de produtos do Projeto PRÒ-ATLÂNTICA.

Ao Instituto Estadual de Florestas de São Paulo (IEF) e à Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo pelo acesso a unidades de conservação do litoral paulistano, bem como pela cessão de materiais cartográficos relacionados a estas UCs.

Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) pela autorização de pesquisa nas unidades de conservação de preservação permanente sob sua jurisdição na área estudada. Em especial cumpre agradecer a Miguel Von Ber e Guadalupe Vivekananda (respectivamente diretores da APA de Guaraqueçaba e do PARNA de Superagüi na época da realização de nossas atividades de campo) pela disponibilização de barcos e alojamentos, bem como aos funcionários do IBAMA em Guaraqueçaba e Paranaguá pelo auxílio prestado. A Guadalupe pelo posterior apoio que nos prestou enquanto presidente do Comitê Internacional para a Recuperação e Manejo do Mico-Leão-da-Cara-Preta.

À família Machado pelo acesso à Reserva de Volta Velha, em Itapoá (SC), que engloba a RPPN Fazenda Palmital.

Agradeço o acesso a instalações de campo e pesquisas realizadas pelo Projeto Mico-Leão-Dourado (Dra. Denise Rambaldi e Dra. Maria Cecília Kierulff), pelo Projeto Mico-

Leão-Baiano (Dra. Maria Cristina Alves) e pelo Projeto Mico-Leão-Preto (Dr. Cláudio Pádua e Dr. Laury Cullen).

À Dra. Devra G. Kleiman, do Smithsonian Institution, National Zoological Park, pelo grande apoio ao nosso trabalho, bem como pelo auxílio na obtenção dos equipamentos e pela cessão das gravações de chamadas de *Leontopithecus rosalia* que foram utilizados nos procedimentos de "playback".

À Dra. Maria Cecília Kierulff pela valiosa orientação sobre os procedimentos para a realização dos inventários com "playback".

Ao Dr. Adelmar Coimbra Filho e Dr. Alcides Pissinatti (Centro de Primatologia do Rio de Janeiro) e ao Dr. Russel Mittermeier (Primate Specialist Group – IUCN, CI), pelo importante auxílio no início de nossas atividades envolvendo *Leontopithecus caissara*.

Ao Almirante Ibsen de Gusmão Câmara, primeiro presidente do Comitê Internacional para a Recuperação e Manejo do Mico-Leão-da-Cara-Preta, pelo significativo apoio ao longo de nossa trajetória de trabalho com este primata.

Destacado agradecimento presto ao povo da região litorânea do Paraná e do sul de São Paulo, em especial aos moradores da Ilha de Superagüi e vizinhanças, este povo caiçara que me forneceu boa parte do conhecimento que adquiri sobre *Leontopithecus caissara* e sobre a biodiversidade da região, em seus aspectos físicos, bióticos e culturais. Expresso minha gratidão, sobretudo, aos moradores da comunidade de Barra do Ararapira, que muito apoioram nossas atividades na Ilha de Superagüi. Ao líder desta comunidade, Rubens, por demonstrar a força que pode ter a ação de defender as posições em que acredita, pois sua atuação junto à comunidade representou um dos primeiros episódios de conservação de uma área desencadeada por comunidades locais, defendendo da grilagem predatória toda a biodiversidade local, o ambiente e os habitantes caiçaras, sejam estes das comunidades da flora, da fauna ou humanas. Ao Dorcéu e família, por nos acolherem com a maior generosidade e carinho, nos auxiliando em atividades de campo e domésticas, nos consolando nos momentos difíceis e nos ensinando, em meio a tamanha simplicidade, o que significa dignidade e identidade cultural.

Presto sinceros agradecimentos aos pesquisadores, estagiários e funcionários do Museu de História Natural "Capão da Imbuia" (Prefeitura Municipal de Curitiba – PR), instituição onde teve início a minha formação profissional e este trabalho. A Márcio Bitttencourt, pela coragem de permitir que jovens estagiários pudessem exercer ali suas pesquisas, possibilitando a criação de um ambiente estimulante e efervescente do qual eu tive o privilégio de participar. Especialmente aos amigos Fernando Straube, Renato Bérnils,

Alexandre Morais, Júlio Moura Leite, Ricardo Pinto da Rocha, José Tadeu W. Motta, Michel Miretzki e Wolmar Wosiak, entre outros que por ali passaram, agradeço pela mágica ambiência que partilhamos, em uma instigadora e saudosa etapa de minha vida. A Magno Vicente Segalla, pelo sempre pronto e expedito auxílio em tantas ocasiões, bem como ao seu primo pelas otimizações no equipamento de "playback". Ao querido Marcos Ricardo Bornschein por ter apostado e compartilhado a obsessão pelo sagüi e pelo auxílio fundamental nas atividades de campo que levaram à descoberta de *L. caissara*. Ao Dinancor (Igo) por ter nos dado o ponto de partida para a descoberta do povo de Superagüi e do "sagüi".

A todos os colegas com quem convivi e trabalhei no Laboratório de Geoprocessamento (LAGEOP), do Instituto de Geociências da UFRJ, especialmente a Oswaldo Abdo pela inestimável ajuda com as bases de dados e o SAGA e a Tiago Badre Marino pelo auxílio com o VistaSAGA, com os bancos de dados e com o VICON.

A todos os colegas com quem convivi no Laboratório de Gestão da Biodiversidade (GESBIO), do Instituto de Biologia da UFRJ, em especial aos queridos Felipe de Noronha Andrade, Gabriel Costa Queiroz, Joyce Barbosa, Vanessa Riccioppo e Ricardo Finotti, por todo o apoio e carinho.

À amiga Marcela Pinillos pela estimulante convivência, colaboração e discussões na interface Ecologia/Geociências que começaram durante o doutorado no Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGE) da UFRJ.

Ao Dr. Nélson Fernandes do PPGE pelas instigantes discussões sobre modelagem e sobre a tríade geologia/geomorfologia/pedologia, bem como por ter prestado atenção ao "brilho nos meus olhos" e ter me intimado a assumir a identidade de biogeógrafa.

Aos funcionários da Secretaria do PPGE, especialmente Ildione e Nildete, pela atenção e auxílio que me dispensaram.

À Flávia Colacchi pelo inestimável auxílio na edição do layout dos mapas em A3.

Ao amigo Mauro José Cavalcanti pela instigante convivência e discussões sobre Biogeografia, complexidade, semiótica e ecoinformática, entre outros tantos temas, que certamente aumentaram o meu *Unwelt*. Agradeço também pela revisão do *abstract* da tese.

Em particular agradeço ao Dr. Dante Luiz Martins Teixeira, meu mentor, cuja presença amiga, companheira, orientadora e inspiradora foi responsável por boa parte da minha formação como pessoa e como profissional em zoologia e conservação, assim como pela decisão de encarar este doutorado.

Ao amigo Fábio Bonatto por todos os ótimos momentos que compartilhamos, bem como por todo o apoio prestado a mim e à Vanessa ao longo de nosso trabalho.

De forma destacada, agradeço a Vanessa Guerra Persson, com quem tenho trabalhado desde a graduação em uma parceira rara de ser encontrada, onde partilhamos tantos projetos, nos erros e nos acertos, nas realizações e nas frustações. Sem a sua participação este trabalho jamais teria sido possível.

Por fim, gostaria de agradecer a Artur Renato Bracet pelo carinho, paciência, compreensão e generosa dedicação com que me tratou ao longo destes anos de doutorado. Foi o seu suporte que me permitiu concluir esta etapa de vida.

Aos amigos, irmãos e demais familiares por resistirem às minhas ausências.

E aos meus pais, sempre e por tudo.

RESUMO

LORINI, Maria Lucia. **Abordagem hierárquica e multiescalar para análises de distribuição geográfica da biodiversidade: sistemas quaternários costeiros da Mata Atlântica como estudos de caso**. Rio de Janeiro, 2007. Tese (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Um dos maiores desafios do séc. XXI consiste na geração de maneiras otimizadas de gestão territorial das paisagens, que conjuguem a obtenção do máximo benefício social com o mínimo de deterioração ambiental e erosão de biodiversidade em longo prazo. Contudo, para encarar este desafio é necesssário trabalhar com sistemas complexos naturais (abióticos e bióticos) e antrópicos (sócio-culturais, econômicos) interatuantes, que refletem heterogeneidades espaço-temporais em múltiplas escalas. Tal complexidade de relação entre padrão e processo é de grande interesse em todas as ciências naturais e sociais, sendo que escala é uma parte integral deste relacionamento e o processo de passagem de escala (*scaling*) resulta imprescindível na pesquisa e na prática. Contudo, ainda que a passagem de escala tenha sido reconhecida como um dos mais importantes e prementes desafios das ciências da vida e da terra, existe uma grande carência de conjuntos de diretrizes ou metodologias sistemáticas de *scaling*, sobretudo quando são consideradas paisagens heterogêneas. Dentro deste contexto de escassez de roteiros metodológicos que possibilitem lidar com a complexidade de sistemas ambientais em um arcabouço espacialmente explícito, a presente tese propõe-se a desenvolver uma abordagem metodológica multiescala dirigida a análises de distribuição geográfica e status de conservação de componentes da biodiversidade. Uma abordagem integrativa e espacialmente explícita, baseada na teoria da Dinâmica Hierárquica de Manchas, foi desenvolvida em ambientes de Sistema Geográfico de Informação com a estratégia de "escada escalar". Esta abordagem multiescala foi aplicada em dois estudos de caso envolvendo sistemas bióticos dos terrenos quaternários costeiros da Mata Atlântica, o primeiro representando o nível de organização de ecossistemas e o segundo, o nível de espécie e populações. No primeiro estudo de caso a distribuição dos ecossistemas quaternários costeiros foi mapeada em uma escala de maior detalhe na região que se estende do litoral norte de SC ao sul de SP, com a passagem de escala para uma visão mais sinóptica e de maior extensão, abrangendo toda a costa oriental brasileira. Nesta extensão geográfica mais ampla, a distribuição dos sistemas arbóreos em uma situação atual (2001) foi comparada à situação pretérita de um cenário pré-colonização européia. Na fase seguinte, uma análise de lacunas indicou o status de proteção destes sistemas em relação à rede de unidades de conservação federais. Focalizando em escalas temporais, um modelo conceitual geral sobre a gênese dos ambientes de acumulação (fluvial e/ou lacustre, fluviomarinho e marinho/eólico) e dos sistemas vegetacionais relacionados foi desenvolvido, sendo as predições do modelo avaliadas em paisagens da região costeira do norte de SC ao sul de SP. Um esboço de evolução paleogeográfica destes ambientes costeiros durante o Quaternário foi também elaborado para duas paisagens da região. No segundo estudo de caso, a distribuição do mico-leão-da-cara-preta (*Leontopithecus caissara*) foi modelada em termos de populações, metapopulação e da espécie *in toto*, desde escalas de paisagem e de região (litoral norte de SC a sul de SP) até de macrorregião (Domínio da Mata Atlântica). A distribuição geográfica de *L. caissara* foi delimitada com a obtenção de sua extensão de ocorrência e área de ocupação (*sensu* IUCN), bem como foi analisada a estrutura espacial do hábitat e das manchas das populações. Uma análise de lacunas subseqüente indicou áreas favoráveis para a espécie que ainda não se encontram protegidas pelas redes de unidades de conservação estaduais e federais. Em termos de conclusões gerais, aponta-se que a distribuição de componentes da biodiversidade pode ser entendida como sistema complexo e que abordagens de investigação integrativas, espacializadas e multiescalares, tais como a desenvolvida nesta tese, podem fornecer um apoio robusto para um melhor entendimento da distribuição e permanência de componentes da biodiversidade. Indica-se também que a distribuição de componentes da biodiversidade dos sistemas quaternários costeiros da Mata Atlântica reflete mudanças climáticas e de nível do mar ocorridas, sobretudo, desde o Holoceno Médio.

ABSTRACT

LORINI, Maria Lucia. **A multiscale hierarchical approach for geographical distribution analyses of biodiversity: Quaternary coastal systems of the Atlantic Forest as case studies.** Rio de Janeiro, 2007. Tese (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Developing and maintaining sustainable landscapes, coupling the maximization of social benefit to minimal long-term environmental degradation and biodiversity erosion, became a major challenge in the XXI century. However, to face this challenge we must deal with interactive complex systems (abiotic, biotic, cultural and socioeconomic) that reflect spatial and temporal heterogeneities in multiple scales. Such a complexity of relationships between pattern and process represents a topic of great interest for all natural and social sciences. Indeed, scale is an integral part of this relationship and the process of scaling, the translation of information between or across scales, becames essential in both the research and applied activities. Nevertheless, although scaling has being recognized as one of the most important and pressing challenges for the life and earth sciences, there is a great lack of directives and systematic methodologies of scaling, especially when one deals with heterogeneous landscapes. In this context of shortage of methodological frameworks to deal with complex environmental systems in a spatially explicit manner, the proposal of the present thesis was to develop a multiscale methodological approach directed to analyses of geographical distribution and conservation status of biodiversity components. An integrative spatially explicit approach of the Hierarchical Patch Dynamics theory was developed in Geographical Information Systems with the "scaling ladder" strategy. This spatial and multiscale approach was applied to two case studies, encompassing biotic systems of the Quaternary coastal lands of the Atlantic Forest, the first at the organization level of ecosystems and the second, at the species and populations level. In the first case study, the distribution of Quaternary coastal ecosystems was mapped at a more detailed scale in the coastal region that extends from northern SC to southern SP, with the subsequent scaling to a more synoptical vision and wider extent, covering the whole oriental Brazilian coast. At this wider geographical extent, the distribution of the arboreous ecosystems in a current (year 2001) and a past (pre-European colonization scenery) situation was compared. In the next step, a gap analysis indicated the current protection status of these ecosystems regarding the federal reserves network. Focusing on temporal scales, a conceptual general model about the genesis of the accumulation environments (fluvial and/or lacustrine, fluviomarine, marine and/or eolic) and related ecosystems was developed, and model predictions were evaluated at landscapes and regional scales in the coastal region of northern SC to southern SP. An outline of the paleogeographical evolution of these coastal environments during the Quaternary was also elaborated for two landscapes of this region. In the second study case, the distribution of the Black-Faced Lion Tamarin (*Leontopithecus caissara*) was modelled in terms of populations, metapopulation and species *in toto*, from landscape and regional (coastal region of northern SC to southern SP) to macroregional (Atlantic Forest Domain) scales. The geographical distribution of *L. caissara* was assessed by delimiting its extension of occurrence and area of occupation (*sensu* IUCN). The spatial structure of the habitat and the population patches was also analyzed. In the final step, a gap analysis indicated suitable areas for the species that are still not protected by the federal and state reserve networks. Among the general conclusions, we pointed that the distribution of biodiversity components can be seen as a complex system, and that integrative and spatially explicit multiscale approaches, like the one developed in this thesis, can be a robust support to a better understanding of distribution and permanence of biodiversity components. In addition, we indicated that the distribution of biodiversity components of the Atlantic Forest Quaternary coastal systems reflects the climate and sea level changes that occurred mainly since medium Holocene.

Lista de ilustrações

1.1. Etapas da investigação e organização da tese..... 14

2.1. Representação esquemática de um sistema complexo 22

2.2. Representação hierárquica de conceitos de escala..... 24

2.3. Representação esquemática dos sete tipos diferentes de operações de passagem de escala..... 30

2.4. Representação esquemática de sistemas de acordo com a teoria hierárquica 32

2.5. Diagrama geral da área de *Computação Natural* que incorpora, entre outras, a linha de pesquisa de Inteligência Computacional 40

3.1. Representação esquemática das estapas de implementação da Dinâmica Hierárquica de manchas na estratégia da "escada escalar"..... 47

3.2. Primeiro recorte geográfico da área de estudo, em escala macrorregional, correspondendo ao Domínio da Mata Atlântica..... 52

3.3. Segundo recorte geográfico da área de estudo, em escala regional, correspondendo ao setor litorâneo entre o sul de São Paulo e o norte de Santa Catarina..... 53

4.1. Representação esquemática das noções de *pixel*, ecótopo e ecocomplexos..... 74

4.2. Esquema geral dos módulos e classificadores no *Land Cover Classification System (LCCS)*..... 82

4.3. Exemplo do esquema dos classificadores e atributos utilizados no *Land Cover Classification System (LCCS)*..... 83

4.4. Resposta média da vegetação sadia mostrando as principais regiões do espectro que interferem no padrão de refletância das folhas..... 111

4.5. Representação esquemática das zonas elípticas de caracterização das assinaturas espectrais das categorias no classificador de Máxima Verossimilhança..... 119

4.6. Exemplo de uma arquitetura neural simplificada..... 120

4.7. Estrutura de uma rede neural de retropropagação com três camadas..... 124

4.8. Imagens da Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e da Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo..... 164

4.9. Imagens da Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e da Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico..... 165

4.10. Imagens da Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico e da Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico..... 166

4.11. Imagens da Formação Arbórea Média secundária intermediária e da Formação Arbórea Baixa secundária intermediária..... 167

4.12. Imagens da Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico, da Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo e da Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico..... 168

4.13. Imagens da Formação Arbustiva sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo e da Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico... 169

4.14. Imagens das Formações Arbustivas e Herbáceas sobre Gleissolo tiomórfico e da Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo..... 170

4.15. Mapa de distribuição dos ecossistemas do quaternário costeiro do litoral norte de SC ao sul de SP..... 178

4.16. Mapa de distribuição dos ecossistemas arbóreos do quaternário costeiro da Mata Atlântica 187

4.17. Arquitetura dos BDGs hierárquicos associados a ecótopos, ecococomplexos de 1ª ordem e ecocomplexos de 2ª ordem..... 202

4.18. Banco de dados de índices de paisagem associado a ecocomplexos de 2ª ordem no BDG da paisagem global do quaternário costeiro da Mata Atlântica, com resolução de 500m..... 203

4.19. Banco de dados de índices de paisagem associado a ecocomplexos de 1ª ordem no BDG da paisagem regional do litoral do norte de SC ao sul de SP, com resolução de 60m..... 204

4.20. Banco de dados de índices de paisagem associado a ecótopos no BDG da paisagem local da planície de Superagï, litoral norte do PR, com resolução de 30m..... 205

4.21. Banco de dados de levantamentos fitossociológicos associado a ecótopos no BDG da paisagem regional do litoral do norte de SC ao sul de SP, na versão com a resolução melhorada para 30m..... 207

5.1. Distintas escalas de mudança climática 219

5.2. Mapa geológico do quaternário costeiro do litoral norte de SC ao sul de SP..... 238

5.3. Subdivisão clássica do litoral brasileiro, baseada em critérios oceanográficos, climáticos e continentais 243

5.4. Modelo conceitual de formação do relevo nas planícies quaternárias do litoral 251

5.5. Modelo proposto de evolução dos sistemas vegetacionais em ambientes de acumulação fluvial 252

5.6. Perfil idealizado da influência da maré na determinação dos limites dos ambientes estuarino e aluvial em uma planície de maré 254

5.7. Modelo proposto de evolução dos sistemas vegetacionais em ambientes de acumulação fluviomarinha 255

5.8. Distribuição latitudinal dos ecossistemas em ambientes de acumulação fluviomarinha 256

5.9. Modelo de evolução dos sistemas vegetacionais em ambientes de acumulação marinha e eólica 258

5.10. Perfil da vegetação na Restinga da Barra de Maricá 260

5.11. Esquema evolutivo para as planícies litorâneas da região de Cananéia-Iguape 264

5.12. Mapeamento geológico e formações vegetacionais em um perfil da porção sul da Ilha de Superagüi 269

5.13. Evolução geológica das planícies litorâneas do sudeste e sul do Brasil durante o Quaternário 274

5.14. Configuração paleogeográfica da planície costeira de Itapoá durante o máximo da transgressão pleistocênica 280

5.15. Configuração paleogeográfica da planície costeira de Itapoá durante o período regressivo após o máximo da transgressão pleistocênica 282

5.16. Diagrama das porcentagens de pólens dos principais táxons encontrados no registro de Volta Velha, planície de Itapoá, litoral norte de Santa Catarina 283

5.17. Configuração paleogeográfica da planície costeira de Itapoá durante o máximo da transgressão holocênica 286

5.18. Configuração atual da planície costeira de Itapoá após o máximo da transgressão holocênica 287

6.1. Esquema da seqüência de estapas sucessivas (*nemoforontes*) da área de distribuição **A** da espécie **a** 304

6.2. Diagrama de Venn mostrando uma representação heurística de fatores que afetam a distribuição geográfica de uma espécie 309

6.3. Realização de entrevista com moradores locais da Ilha do Cardoso 330

6.4. Representação esquemática do alcance da emissão do “playback” das vocalizações mostrando a área coberta por uma estação ou unidade amostral do censo com “playback”..... 334

6.5. Um modelo gráfico dos componentes da estrutura espacial do hábitat 359

6.6. Dois exemplos da distinção entre extensão de ocorrência e área de ocupação 365

6.7. Representação abstrata de uma metapopulação 367

6.8. Representação esquemática de quatro modelos de populações geográficas 369

6.9. Esquema da estrutura espacial das manchas de hábitat disponíveis para as populações de uma espécie hipotética, definida pelos parâmetros de limite de favorabilidade e distância de vizinhança 372

6.10. Estrutura das categorias da classificação da UICN 375

6.11. Mapa com a distribuição dos setores e municípios abrangidos no programa de entrevistas 379

6.12. Mapa de porcentagem de respostas positivas das entrevistas 380

6.13. Mapa mostrando os blocos com resultados positivos e negativos em relação à pesquisa de ocorrência de *L. caissara* realizada pelo inventário com “playback” 382

6.14. Mapa de registros de ocorrência de *L. caissara* 385

6.15. Resultados do método “jacknife” para avaliar a importância das variáveis no experimento com todas as variáveis explicativas na escala de detalhe (paisagem, 30m) 392

6.16. Resultados do método “jacknife” para avaliar a importância das variáveis no experimento com todas as variáveis explicativas na escala intermediária (região, 90m) 393

6.17. Resultados do método “jacknife” para avaliar a importância das variáveis no experimento com todas as variáveis explicativas na escala de menor detalhe (macrorregião/bioma, 1km) 394

6.18. Distribuição potencial de *Leontopithecus caissara* em escala global (domínio da Mata Atlântica), regional (norte de SC a sul de SP) e de paisagem (Guarauqeçaba-PR e Cananéia-SP) 396

6.19. Mapa de favorabilidade do hábitat para *Leontopithecus caissara* 398

6.20. Delimitação da extensão de ocorrência de *L. caissara* 406

6.21. Delimitação da área de ocupação de *L. caissara* via contagem de células ocupadas em uma grade de 2 x 2km sobre a extensão de ocorrência da espécie 407

6.22. Sobreposição do polígono da extensão de ocorrência de *L. caissara* sobre o hábitat potencial da espécie 408

6.23. Delimitação da área de ocupação de *L. caissara* via obtenção da àrea de hábitat modelado existente na extensão de ocorrência da espécie 409

6.24. Mapa das distâncias efetivas a partir da área de ocupação de *L. caissara* 412

6.25. Mapa de localidades das populações de *L. caissara* 413

6.26. Mapa de favorabilidade do hábitat para as populações de *L. caissara* 414

6.27. Mapa resultante da Análise de Lacunas (“Gap Analysis”) mostrando as áreas favoráveis para *L. caissara* que não estão protegidas em unidades de conservação de proteção integral 421

Lista de tabelas

4.1. Documentos fotográficos e cartográficos utilizados como apoio ao longo da interpretação das imagens 72

4.2. Arquitetura de níveis para o estudo da distribuição de sistemas arbóreos do Domínio da Mata Atlântica em terrenos quaternários costeiros 76

4.3. Níveis da fase dicotômica do *Land Cover Classification System (LCCS)* 80

4.4. Exemplo de legenda mostrando os códigos de uma classe gerada a partir do software LCCS 83

4.5. Esquema de classificação do Sistema Fitogeográfico brasileiro até a escala exploratória 86

4.6. Esquema de classificação do Sistema Fitogeográfico brasileiro para escalas de maior detalhe 87

4.7. Legenda para as classes singulares de cobertura do solo 93

4.8. Legenda final com as classes de cobertura do solo incluindo as classes mistas 103

4.9. Descrição das imagens de satélite selecionadas para o região do litoral norte de Santa Catarina ao sul de São Paulo 106

4.10. Classificação dos valores do coeficiente Kappa 129

4.11. Tabulação cruzada do número de pixels correta e incorretamente classificados por dois algoritmos classificadores, com base nas duas matrizes de confusão geradas pelos dois métodos 129

4.12. Matriz comparativa dos Índices de Concordância Kappa ("Kappa Index of Agreement"-KIA) geral e por categoria, resultantes das classificações realizadas com os algoritmos de Fisher, de Máxima Verossimilhança (Maxlike) e de Rede Neural Artificial (RNA) 173

4.13. Matrix de acurácia da classificação efetuada com o algoritmo de rede neural artificial sobre as bandas Landsat 7/ETM+ (1,2,3,4,5,7 + brilho, verdor e umidade da trans formação Tasseled Cap) 179

4.14. Planimetria das classes de cobertura dos terrenos quaternários costeiros do norte de SC ao sul de SP 182

4.15. Matriz de acurácia da clasificação efetuada com o algoritmo de rede neural artificial sobre as bandas MODIS de campo contínuo 185

4.16. Planimetria das classes de cobertura dos terrenos quaternários costeiros do leste do Brasil 188

4.17. Distribuição regional das perdas e permanências de coberturas arbóreas quaternárias costeiras 190

4.18. Área de distribuição total dos ecocomplexos arbóreos do quaternário litorâneo brasileiro 191

4.19. Distribuição dos ecocomplexos arbóreos segundo as classes de tamanho das manchas 192

4.20. Índices de paisagem descritores dos sistemas arbóreos quaternários costeiros. Teste U de Mann Whitney para comparação entre as situações pretérita e atual 193

4.21. Distribuição das áreas de cobertura de ecocomplexos arbóreos do quaternário costeiro em relação ao sistema federal de unidades de conservação 195

4.22. Relação das unidades de conservação federal que contém áreas de ecossistemas arbóreos quaternários 197

4.23. Resultado das análises de autocorrelação espacial global (I de Moran) na distribuição dos sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica, nos três níveis hierárquicos estudados 199

5.1. Hierarquia temporal dos processos que controlam os padrões evolutivos 222

5.2. Documentos fotográficos e cartográficos utilizados como apoio 236

5.3. Planimetria cruzada entre as classes de vegetação e de geologia 267

5.4. Arcabouço geológico e distribuição das formações vegetacionais obtidas em campo por Jaster (1995) na Ilha de Superagüi (litoral norte do Paraná) 268

6.1. Processos envolvidos na configuração da área de distribuição geográfica de uma espécie, bem como respectivas escalas associadas 307

6.2. Arquitetura de níveis para o estudo da distribuição de *L. caissara* no Domínio da Mata Atlântica 327

6.3. Classificação dos valores de acurácia de predição dos modelos segundo a estatística AUC (“Area Under the Curve”), derivada da curva ROC (“Relative Operating Characteristic”) 355

6.4. Distribuição das respostas obtidas no programa de entrevistas 378

6.5. Comparação dos resultados globais obtidos no programa de entrevistas e no inventário com “playback” realizados para investigar a ocorrência de *L. caissara* 381

6.6. Resultado da análise ROC para a modelagem de distribuição da espécie alvo efetuada pelos quatro algoritmos selecionados com base nas variáveis bioclimáticas ... 386

6.7. Resultados da análise ROC de avaliação de desempenho e da importância de variáveis explicativas para os experimentos de modelagem nas três escalas espaciais .. 390

6.8. Resultados da assinatura ambiental dos registros positivos do censo com "playback" sobre o mapa de favorabilidade do hábitat 399

6.9. Perfil bioclimático e altimétrico das áreas de presença de *L. caissara* resultantes das assinaturas ambientais dos registros positivos do censo com "playback" sobre as variáveis bioclimáticas 400

6.10. Resultados das assinaturas ambientais dos registros positivos do censo com "playback" sobre as variáveis vegetação e geologia 402

6.11. Planimetria das localidades das populações sobre o mapa de favorabilidade do ambiente para *L. caissara* 415

6.12. Planimetria das áreas das populações com respeito ao nível de favorabilidade do hábitat para *L. caissara* 415

6.13. Estimativas necessárias para utilizar a classificação da IUCN (2001), calculadas para três situações distintas com respeito aos níveis de favorabilidade de hábitat incluídos nas computações 417

6.14. Planimetria das manchas de áreas favoráveis para *L. caissara* e que não se encontram protegidas 420

Sumário

Rosto …..... i

Folha de aprovação ii

Dedicatória .....…..... iii

Agradecimentos iv

Resumo ix

Abstract x

Lista de ilustrações ...…..... xi

Lista de tabelas …….... xvi

Sumário xix

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Motivação, problemática e escopo da pesquisa 2

1.1.1. MUDANÇAS AMBIENTAIS E O IMPERATIVO DA PREDIÇÃO ECOLÓGICA 2

1.1.2. DIFICULDADES ORIUNDAS DA COMPLEXIDADE, ESCALA E HETEROGENEIDADE ESPACIAL 4

1.1.3. ABORDAGENS PARA TRATAR COMPLEXIDADE, ESCALA E HETEROGENEIDADE ESPACIAL 6

1.1.4. OS ELEMENTOS DA BIODIVERSIDADE TOMADOS COMO ALVO DA PESQUISA 8

1.2. Objetivos gerais da pesquisa 10

1.3. Hipóteses gerais da pesquisa 11

1.4. Organização da tese 13

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-CONCEITUAL 18

2.1. Sistemas complexos 19
2.2. Escala 23
2.2.1. DIMENSÕES DE ESCALA 25
2.2.2. TIPOS DE ESCALA 25
2.2.3. COMPONENTES DE ESCALA 26
2.2.4. A PROBLEMÁTICA DA ESCALA 27
2.2.5. PASSAGEM DE ESCALA 28
2.3. Teoria da Hierarquia 30
2.4. Dinâmica Hierárquica de Manchas (DHM) 34
2.5. Geoprocessamento e Sistemas Geográficos de Informação 36
2.6. Geocomputação e Ecoinformática 38
2.7. Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina 39

CAPÍTULO 3. DIRETRIZES METODOLÓGICAS GERAIS 44

3.1. Diretrizes metodológicas gerais 45
3.1.1. ABORDAGEM GERAL DA PESQUISA 45
3.1.2. DIRETRIZES METODOLÓGICAS PARA A PASSAGEM DE ESCALA 46
3.1.3. DIRETRIZES METODOLÓGICAS DE GEOPROCESSAMENTO 48
3.1.3.1. Procedimentos diagnósticos 48
3.1.3.2. Procedimentos prognósticos e retrospectivos 50
3.1.3.3. Ambientes computacionais 50
3.2. Área de estudo 51
3.2.1. RECORTE 1: TERRENOS QUATERNÁRIOS NO DOMÍNIO DA MATA ATLÂNTICA 51
3.2.2. RECORTE 2: REGIÃO COSTEIRA SUL-SUDESTE 53

CAPÍTULO 4. NÍVEL DE ECOSSISTEMAS: DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA E STATUS DE CONSERVAÇÃO 56

4.1. Considerações iniciais 57
4.1.1. A IMPORTÂNCIA DO TEMA COBERTURA DO SOLO 57
4.1.2. SENSORIAMENTO REMOTO E MAPEAMENTO MACRORREGIONAL DE COBERTURA DO SOLO 60
4.1.3. PROBLEMAS NA CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS E MÉTODOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 62

4.2. Abordagens e motivação da pesquisa 64
4.3. Objetivos da pesquisa 66
4.4. Hipóteses da pesquisa 68
4.5. Materiais e métodos 71
4.5.1. INVENTÁRIO DE FONTES BIBLIOGRÁFICAS E CARTOGRÁFICAS 71
4.5.2. DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE ENTIDADES BIOLÓGICAS E DA HIERARQUIA DE MANCHAS 73
4.5.2.1. Definição das classes de entidades biológicas 73
4.5.2.2. Desenho da hierarquia de manchas 75
4.5.2.3. Definição das classes de ecótopos 77
4.5.2.3.1. O Sistema de Classificação de Cobertura do Solo (*Land Cover Classification System - LCCS*) 78
4.5.2.3.2. O Sistema Fitogeográfico Brasileiro 84
4.5.2.3.3. Construção da legenda para o mapeamento dos ecótopos 87
4.5.4. CRIAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS 104
4.5.4.1. Recorte 1: Terrenos Quaternários no Domínio da Mata Atlântica 104
4.5.4.2. Recorte 2: Região Costeira Sul-Sudeste (litoral norte do Estado de Santa Catarina ao litoral sul do Estado de São Paulo)..... 104
4.5.5. CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DA COBERTURA DO SOLO 105
4.5.5.1. Seleção dos produtos de imagens 106
4.5.5.2. Registro e mosaico das imagens 108
4.5.5.3. Realce das imagens 109
4.5.5.4. Seleção de algoritmos classificatórios e classificação digital de imagens 114
4.5.5.5. Algoritmos classificatórios 116
4.5.5.5.1. *O classificador de Fisher* 117
4.5.5.5.2. *O classificador de Máxima Verossimilhança* 118
4.5.5.5.3. *Redes Neurais Artificiais (RNAs)* 119
4.5.5.5.4. *RNAs do tipo perceptron multi-camadas com retropropagação* 123
4.5.5.6. Avaliação de desempenho dos algoritmos classificatórios 127
4.5.5.7. Classificação final 131
4.5.5.7.1. *Recorte geográfico: região litorânea do norte de Santa Catarina ao sul de São Paulo* 131
4.5.5.7.2. *Recorte geográfico: faixa litorânea do Brasil oriental* 132
4.5.6. CRIAÇÃO DOS DEMAIS PLANOS DE INFORMAÇÃO 133
4.5.6.1. Mapa geológico 133
4.5.6.2. Mapa de grupos de vegetação 134

4.5.6.3. Modelo digital de elevação e mapa de declividade 134
4.5.6.4. Mapa do Domínio da Mata Atlântica 135
4.5.6.5. Mapa de Unidades de Conservação 135
4.5.6.6. Mapas de estados e municípios 138
4.5.7. OBTENÇÃO DE ÍNDICES DESCRITORES DE PADRÃO ESPACIAL 138
4.5.7.1. Índice de Compactação (IC) 138
4.5.7.2. Dimensão Fractal (DF) 139
4.5.7.3. Índice de Fragmentação (IF) 141
4.5.7.4. Índice de Diversidade (H) 141
4.5.8. ANÁLISE DE ASSOCIAÇÃO ESPACIAL 142
4.5.9. MONITORIAS AMBIENTAIS 145
4.5.10. ANÁLISE DE LACUNAS DE CONSERVAÇÃO (*GAP ANALYSIS*) 146
4.5.11. CRIAÇÃO DE BANCOS DE DADOS ALFANUMÉRICOS GEOCODIFICADOS 147
4.5.11.1. Medidas descritoras de paisagem 147
4.5.11.2. Levantamentos fitossociológicos 148
4.6. Resultados e discussões 148
4.6.1. DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS CLASSES DE ECÓTOPOS 148
4.6.2. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E SELEÇÃO DOS ALGORITMOS DE CLASSIFICAÇÃO DIGITAL 171
4.6.3. CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DA COBERTURA DO SOLO PARA A REGIÃO LITORÂNEA SUL-SUDESTE 174
4.6.3.1. Treinamento das redes 175
4.6.3.2. Classificação e mapeamento da cobertura do solo 176
4.6.3.3. Planimetrias do mapeamento 180
4.6.4. CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO PARA A REGIÃO DO LITORAL LESTE DO BRASIL 183
4.6.4.1. Treinamento das redes 183
4.6.4.2. Classificação e mapeamento da cobertura do solo 184
4.6.4.3. Planimetrias do mapeamento 188
4.6.5. MONITORIA DOS ECOCOMPLEXOS ARBÓREOS ENTRE A SITUAÇÃO PRETÉRITA E 2001 189
4.6.6. ANÁLISE DAS MEDIDAS DESCRITORAS DE PADRÃO ESPACIAL 193
4.6.7. ANÁLISE DE LACUNAS DE CONSERVAÇÃO (*GAP ANALYSIS*) 194
4.6.8. ANÁLISE DE ASSOCIAÇÃO ESPACIAL 198
4.6.9. CRIAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS E DOS BANCOS DE DADOS ALFANUMÉRICOS GEOCODIFICADOS 200

4.6.9.1. Banco de dados de índices de paisagem 203
4.6.9.2. Banco de dados de levantamentos fitossociológicos 205
4.7. Conclusões do capítulo 207

CAPÍTULO 5. NÍVEL DE ECOSSISTEMAS: GÊNESE DOS AMBIENTES 215

5.1. Considerações iniciais 216
5.1.1. MUDANÇAS AMBIENTAIS E A DIMENSÃO TEMPORAL DA BIODIVERSIDADE 216
5.1.2. MUDANÇAS AMBIENTAIS NO QUATERNÁRIO E O IMPACTO NA DISTRIBUIÇÃO DA BIODIVERSIDADE 223
5.2. Abordagens e motivação da pesquisa 228
5.3. Objetivos da pesquisa 232
5.4. Hipóteses da pesquisa 232
5.5. Materiais e métodos 235
5.5.1. INVENTÁRIO DE FONTES BIBLIOGRÁFICAS E CARTOGRÁFICAS 235
5.5.2. ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO DE GÊNESE DOS SISTEMAS ALVO 237
5.5.2.1. Cruzamento entre os mapeamentos de vegetação e de geologia 237
5.5.2.2. Comparação com levantamentos botânicos 239
5.5.3. ESBOÇO DA EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA DOS SISTEMAS QUATERNÁRIOS COSTEIROS 240
5.6. Resultados e discussões 241
5.6.1. ASPECTOS AMBIENTAIS DOS SISTEMAS QUATERNÁRIOS DO LITORAL DO BRASIL 241
5.6.1.1. Aspectos físicos dos sistemas litorâneos 241
5.6.1.2. Aspectos vegetacionais dos sistemas litorâneos 248
5.6.2. MODELO CONCEITUAL DA GÊNESE DOS AMBIENTES QUATERNÁRIOS COSTEIROS 250
5.6.2.1. Ecossistemas de ambiente de acumulação fluvial e/ou lacustre 251
5.6.2.2. Ecossistemas de ambiente de acumulação fluviomarinha 253
5.6.2.3. Ecossistemas de ambiente de acumulação marinha e eólica 257
5.6.3. A DISTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS VEGETACIONAIS QUATERNÁRIOS COSTEIROS: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO ENTRE O NORTE DE SANTA CATARINA E O SUL DE SÃO PAULO 263
5.6.3.1. Predição da distribuição dos sistemas vegetacionais alvo segundo o modelo conceitual elaborado 263
5.6.3.2. Teste das predições do modelo via cruzamento entre os mapeamentos de vegetação e de geologia-geomorfologia 265

5.6.3.3. Teste das predições do modelo via comparação com levantamentos botânicos 268
5.6.3.5. Avaliação das predições do modelo 270
5.6.4. ESBOÇO DA EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA DOS SISTEMAS QUATERNÁRIOS COSTEIROS 271
5.6.4.1. Modelos de evolução paleogeográfica para ambientes da costa sul e sudeste do Brasil 271
5.6.4.2. Setor 1: Península de Superagüi 275
5.6.4.2. Setor 2: Planície de Itapoá 278
5.6.4.4. Sobre a evolução paleoambiental do quaternário costeiro da região entre o norte de SC e o sul de SP 288
5.7. Conclusões do capítulo 289

CAPÍTULO 6. NÍVEL DE ESPÉCIE E POPULAÇÕES: DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA E STATUS DE CONSERVAÇÃO 296

6.1. Considerações iniciais 297
6.1.1. MUDANÇAS GLOBAIS E O IMPACTO SOBRE A DISTRIBUIÇÃO E PERSISTÊNCIA DE ESPÉCIES E POPULAÇÕES 298
6.1.2. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE ESPÉCIES, COMPLEXIDADE E ESCALA 301
6.1.3. AVANÇOS NA MODELAGEM PREDITIVA DE ESPÉCIES E POPULAÇÕES 310
6.2. Abordagem e motivação da pesquisa 314
6.3. Objetivos da pesquisa 316
6.4. Hipóteses da pesquisa 317
6.5. Materiais e métodos 321
6.5.1. INVENTÁRIO DE FONTES BIBLIOGRÁFICAS E CARTOGRÁFICAS 321
6.5.2. DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE ENTIDADES BIOLÓGICAS E DA HIERARQUIA DE MANCHAS 322
6.5.2.1. Definição das classes de entidades biológicas 322
6.5.2.2. Desenho da hierarquia de manchas 326
6.5.3. LEVANTAMENTO DA OCORRÊNCIA DE *LEONTOPITHECUS CAISSARA* 328
6.5.3.1. Programa de entrevistas 328
6.5.3.2. Inventário de campo da presença de *L. caissara* com o uso de "playback" de vocalizações 331
6.5.3.3. Levantamento de registros de ocorrência de *L. caissara* obtidos em estudos prévios 335
6.5.4. LEVANTAMENTO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS 335
6.5.4.1. Climáticos 336

6.5.4.2. Morfo-geológicos 337
6.5.4.3. Bióticos 338
6.5.4.4. Antrópicos 338
6.5.5. CRIAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS 339
6.5.5.1. Recorte 1: Domínio do bioma da Mata Atlântica 339
6.5.5.2. Recorte 2: Região costeira sul-sudeste (litoral norte do Estado de Santa Catarina ao litoral sul do estado de São Paulo) 340
6.5.5.2.1. *Matriz com pixel de 30 m* 340
6.5.5.2.2. *Matriz com pixel de 90 m* 340
6.5.6. MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO 341
6.5.6.1. Seleção e preparação das variáveis 341
6.5.6.2. Seleção dos algoritmos de modelagem 344
6.5.6.3. Breve panorama dos modelos de distribuição preditiva de espécies 345
6.5.6.3.1. *Métodos de envelopes bioclimáticos* 347
6.5.6.3.2. *Métodos que utilizam dados de presença e supõem ausência* 347
6.5.6.4. Algoritmos selecionados para avaliação de desempenho 348
6.5.6.4.1. *Bioclim* 349
6.5.6.4.2. *Domain* 349
6.5.6.4.3. *Algoritmo discriminante de Fisher* 350
6.5.6.4.4. *Maxent* 351
6.5.6.5. Avaliação de desempenho dos algoritmos de modelagem 354
6.5.6.6. Modelagem final da distribuição de *Leontopithecus caissara* 356
6.5.7. CARACTERIZAÇÃO DO HÁBITAT NOS LOCAIS DE REGISTRO DE *L. CAISSARA* 361
6.5.8. IDENTIFICAÇÃO DO HÁBITAT POTENCIALMENTE DISPONÍVEL PARA *L. CAISSARA* ... 362
6.5.9. PESQUISA DE DISJUNÇÕES NA DISTRIBUIÇÃO 363
6.5.10. DELIMITAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE *L. CAISSARA* 363
6.5.10.1. Extensão de ocorrência 364
6.5.10.2. Área de ocupação 364
6.5.11. ANÁLISE DA ESTRUTURA DO HÁBITAT PARA AS POPULAÇÕES DE *L. CAISSARA* 366
6.5.12. CLASSIFICAÇÃO DO STATUS DE CONSERVAÇÃO DE *L. CAISSARA* 374
6.5.13. ANÁLISE DO STATUS DE PROTEÇÃO DO HÁBITAT DE *L. CAISSARA* E INDICAÇÃO DE ÁREAS PARA AÇÕES DE MANEJO 375
6.6. Resultados e Discussões 377
6.6.1. LEVANTAMENTO DA OCORRÊNCIA DE *LEONTOPITHECUS CAISSARA* 377
6.6.1.1. Programa de entrevistas 377

6.6.1.2. Inventário de campo da presença de *L. caissara* com "playback" de vocalizações 381
6.6.1.3. Levantamento de registros de ocorrência de *L. caissara* obtidos em estudos prévios 383
6.6.2. MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO 384
6.6.2.1. Seleção e preparação das variáveis 384
6.6.2.2. Avaliação de desempenho dos algoritmos de modelagem 386
6.6.2.3. Modelagem final da distribuição de *Leontopithecus caissara* 388
6.6.3. IDENTIFICAÇÃO DO HÁBITAT POTENCIALMENTE DISPONÍVEL PARA *L. CAISSARA* ... 397
6.6.4. CARACTERIZAÇÃO DO HÁBITAT NOS LOCAIS DE REGISTRO DE *L. CAISSARA* 399
6.6.5. PESQUISA DE DISJUNÇÕES NA DISTRIBUIÇÃO 402
6.6.6. DELIMITAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE *L. CAISSARA* 403
6.6.6.1. Extensão de ocorrência 404
6.6.6.2. Área de ocupação 404
6.6.7. ANÁLISE DA ESTRUTURA DO HÁBITAT PARA AS POPULAÇÕES DE *L. CAISSARA* 410
6.6.8. CLASSIFICAÇÃO DO STATUS DE CONSERVAÇÃO DE *L. CAISSARA* 416
6.6.9. ANÁLISE DO STATUS DE PROTEÇÃO DO HÁBITAT DE *L. CAISSARA* E NDICAÇÃO DE ÁREAS PARA AÇÕES DE MANEJO 419
6.7. Conclusões do capítulo 422

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 429

7.1. Sobre as hipóteses e objetivos gerais 430
7.2. Sobre os desenvolvimentos futuros 436
7.3. Sobre as possibilidades de aplicação 438
7.4. Considerações finais 440

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 442

Capítulo 1

Introdução

Curiously, the unexpected complexity that has been discovered in nature has not led to a slowdown in the progress of science, but on the contrary to the emergence of new conceptual structures that now appear as essential to our understanding of the physical world - the world that includes us. Humanity is at the beginning of a new scientific era. We are observing the birth of a science that is no longer limited to idealized and simplified situations but reflects the complexity of the real world.

Ilya Prigogine

Complexity is what financial markets, mammalian immune systems and ecological communities have in common. The ability to interact with the environment, to recognize patterns in the world and to apply acquired knowledge to the modification of future behaviour is easily detected, yet the definition of complexity remains elusive.

L. Marschall

Esta tese de doutoramento tem como tema o tratamento da natureza complexa, espacial e multiescalar inerente ao fenômeno da distribuição geográfica da biodiversidade. Para tratar este tema, a abordagem adotada resulta inevitavelmente interdisciplinar, no cruzamento entre campos disciplinares da Biologia, Ecologia, Geociências, Geografia e Computação. Este capítulo introdutório procura fornecer uma visão geral dos assuntos abordados neste trabalho, sendo que, em linhas gerais, o texto está organizado da maneira listada a seguir. Na seção 1.1. são apresentados a motivação, a problemática e o escopo do estudo, com explanações acerca das mudanças ambientais e o imperativo da predição ecológica, das dificuldades oriundas da complexidade, escala e heterogeneidade espacial e das abordagens utilizadas para tratá-las, bem como apresenta os elementos da biodiversidade tomados como alvo da pesquisa. Nas seções 1.2 e 1.3 são elencados, respectivamente, os objetivos e as hipóteses gerais da pesquisa. Por fim, a seção 1.4. apresenta a organização geral da tese, com uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

1.1. Motivação, problemática e escopo da pesquisa

1.1.1. MUDANÇAS AMBIENTAIS E O IMPERATIVO DA PREDIÇÃO ECOLÓGICA

Neste momento da história as modificações induzidas pelo homem à atmosfera e à biosfera atingiram tal ponto que muitos cientistas atualmente reconhecem uma nova época geológica: o Antropoceno (CRUTZEN, 2002). As transformações causadas pela ação do homem sobre o planeta atingiram insuspeitada significância em termos de suas proporções, de suas taxas de propagação e das escalas espaciais alcançadas. À guisa de exemplo: pelo menos 50% da superfície do globo livre de gelo já foi alterada por diversos usos da terra; 25% da média anual da água envolvida no escoamento superficial é desviada para uso antrópico; a quantidade de metano na troposfera já dobrou e o nível de dióxido de carbono cresceu 25% desde a era pré-industrial; a temperatura média global aumentou 0,6ºC desde 1900; a cobertura de neve da superfície terrestre diminuiu mais de 10% desde 1960; a diversidade biológica já sofreu redução considerável; 85% das terras mundiais de agropecuária contém áreas degradadas pela erosão, salinização, compactação e perda de nutrientes do solo, degradação biológica ou poluição, ocorridas nos últimos 50 anos (TURNER II *et al*., 1994; VITOUSEK *et al*., 1997; ROJSTACZER *et al*., 2001; MYERS *et al*., 2000; GASTON *et al*., 2003; MEA, 2005).

Já é de consenso que as mudanças ambientais globais que estão sendo observadas na Terra são reais e muito sérias e que o planeta vivo encontra-se em um estado sem análogos no passado (MEA, 2005; LEWIS, 2006; IPCC, 2007). O século XXI provavelmente testemunhará a aceleração e a intensificação de muitas destas modificações, que terão o potencial de rivalizar com as maiores perturbações já ocorridas na história da Terra (LEWIS, 2006). Duas previsões destacam-se: (a) as mudanças no uso do solo provavelmente causarão a sexta extinção em massa na história evolutiva dos sistemas biológicos (MYERS *et al*., 2000;

PIMM e RAVEN, 2000) e (b) as concentrações CO_2 atmosféricas atingirão os níveis mais altos dos últimos 60 milhões de anos (ROYER *et al*., 2001), causando elevação futura de temperatura (IPCC, 2001) e possivelmente mudanças climáticas abruptas (ALLEY *et al*., 2003).

Neste planeta singular, a atmosfera, os oceanos, os ecossistemas terrestres e o *Homo sapiens* dominante, todos interagem de maneiras complexas, sendo que as modificações em um componente afetam o comportamento dos outros. Tais mudanças são muitas vezes caracterizadas por respostas não-lineares, mecanismos complexos de retroalimentação e mudanças de limiar, o que torna crítico compreender as conexões entre os componentes. Tendo em vista que os seres humanos, sem exceção, dependem dos serviços dos ecossistemas como fonte de alimento, água e como base física de suas culturas, o entendimento destes diversos sistemas e suas interações, bem como a compreensão do sistema Terra como um todo integrado, adquire essencial importância para que a sociedade tenha a oportunidade de lidar com estes grandes desafios ambientais e sociais oriundos das mudanças globais (LEWIS, 2006).

É neste contexto que a habilidade preditiva sobre sistemas ecológicos, considerada por muitos como a confirmação final da teoria e do entendimento em Ecologia, vem assumindo um papel de crescente importância na Ecologia Aplicada, ao longo das últimas décadas (PIELKE e CONANT, 2003; OLDEN *et al*., 2006). Esta tendência deve-se, em grande parte, à magnitude atual das ameaças para a biodiversidade advindas das mudanças ambientais globais, que tornam a predição ecológica uma necessidade imperativa (CLARK *et a*l., 2001; MEA, 2005).

Na agenda política internacional, a peocupação com o enfrentamento da crise ambiental e da biodiversidade encontra-se expressa na definição da meta de ***"Garantir a sustentabilidade ambiental até 2015"***, um dos oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio

assumidos pelos países membros das Nações Unidas, bem como pela meta de ***"Reduzir a erosão de biodiversidade até 2010"***, objetivo estabelecido pelos países membros da Convenção da Diversidade Biológica.

1.1.2. DIFICULDADES ORIUNDAS DA COMPLEXIDADE, ESCALA E HETEROGENEIDADE ESPACIAL

De fato, um dos maiores desafios do século XXI certamente consiste na geração de maneiras otimizadas de gestão territorial das paisagens, que conjuguem a obtenção do máximo benefício social com o mínimo de deterioração ambiental e erosão de biodiversidade em longo prazo. Contudo, para encarar estes desafios é necesssário trabalhar com ***sistemas complexos*** naturais (abióticos e bióticos) e antrópicos (sócio-culturais, econômicos) interatuantes, que refletem ***heterogeneidades espaço-temporais*** em ***múltiplas escalas***.

Tal complexidade de relação entre padrão e processo é de grande interesse em todas as ciências naturais e sociais, sendo que ***escala*** é uma parte integral deste relacionamento (MEENTEMEYER, 1989; LEVIN, 1992; WU e LOUCKS 1995; BLÖSCHL e SIVAPALAN, 1995; PETERSON e PARKER, 1998; MARCEAU, 1999; MEADOWCROFT, 2002).

Entendida como a parametrização de nossa janela de percepção da realidade, escala pode ser definida como o período de tempo e espaço sobre o qual sinais são integrados para passar uma mensagem (ALLEN e STARR, 1982), podendo ser caracterizada em termos de seu grão e extensão. Para melhor compreender esta noção, é útil ter em mente que a percepção da escala estrutura-se segundo três dimensões fundamentais: o ***espaço***, o ***tempo*** e o ***nível de organização***.

Na atualidade já está bem documentado que padrões e processos fisiográficos, ecológicos e socioeconômicos operam em uma ampla gama de escalas espaciais e temporais (WU e LI, 2006). Do mesmo modo, entende-se que o processo de ***passagem de escala*** (tratado sob o termo ***"scaling"*** na literatura internacional) é imprescindível na pesquisa e na

prática quando quer que seja necessário fazer predições em uma escala diferente daquela em que os dados são adquiridos.

Ao mesmo tempo, sendo a espacialidade do mundo uma condição inescapável, qualquer técnica ou processo que auxilie a pensar espacialmente torna-se fundamental para entender como a natureza funciona (TILMAN e KAREIVA, 1997; MILLINGTON *et al*., 2001). Tornou-se consensual entre os ecólogos o reconhecimento de que a esmagadora maioria dos dados em macroecologia e biodiversidade exibem fortes padrões espaciais, que muitas vezes são dirigidos por processos biológicos espacialmente estruturados (RANGEL *et al*., 2006; CARL e KHUN, 2007).

Contudo, ainda que necessária em muitos estudos ecológicos, a passagem de escala espacial também pode ser extremamente desafiadora tanto na teoria quanto na prática, sendo ainda mais complicada em função da heterogeneidade espacial, a qual pode manifestar-se em diferentes padrões de uso e cobertura do solo, topografia, hidrologia, solos, condições climáticas e fatores biológicos (LI e WU, 2006).

No que concerne a estudos ecológicos, é fato que a maioria das investigações têm sido conduzida, tradicionalmente, em escalas locais, ao passo que os problemas ambientais e de conservação e manejo de recursos muitas vezes têm que ser tratados em escalas muito mais amplas (escala de paisagem, de região ou global). Além disto, tendo em vista que fenômenos ecológicos ocorrem em um largo espectro de escalas, com freqüentes interligações hierárquicas, relacionar informação através de escalas e níveis de organização biológica torna-se uma parte essencial do entendimento ecológico (LEVIN, 1992; WU, 1999; CHAVE e LEVIN, 2003). A título de exemplo, a dinâmica das populações locais em cada mancha habitada, assim como as interações entre as manchas de populações, são cruciais para a compreensão da dinâmica da população à escala da paisagem. Já a dinâmica de cada rede de manchas de populações estruturada na paisagem, bem como as interações entre as mesmas,

são essenciais para elucidar as trajetórias de redes de populações geográficas regionais. Por sua vez, estas redes regionais de populações e suas interações têm papel fundamental na dinâmica em escala global, ou seja, na trajetória de estabelecimento e permanência da espécie *in toto*.

Faz-se necessário lembrar que os sistemas ecológicos constituem, em grande parte, sistemas adaptativos complexos, dotados de legados hstóricos, retardos de resposta ("time lags"), não-linearidades e retroalimentações, sendo que tais características dificultam a explicação das variações nos atributos ecológicos, bem como complicam sobremaneira a tarefa de modelar e predizer estes atributos com alguma acurácia e precisão (PETER, 1991; LEVIN, 1998; OLDEN *et al*., 2006). À medida que cresce o reconhecimento da natureza complexa, hierárquica e multiescalar dos sistemas ecológicos, evidencia-se a necessidade de construir modelos mais poderosos e flexíveis para auxiliar o tratamento de temas relativos à conservação e manejo de recursos e da biodiversidade.

Entendida como a totalidade de genes, espécies e ecossistemas em uma região, a biodiversidade representa uma concepção triádica hierárquica (SOLBRIG, 1991; DI CASTRI e YOUNÈS, 1996). Por conseguinte, parece adequado tratar esta temática através da adoção de abordagens de passagem de escalas, as quais poderiam representar estratégias mais eficientes para o estudo de sistemas bióticos complexos.

1.1.3. ABORDAGENS PARA TRATAR COMPLEXIDADE, ESCALA E HETEROGENEIDADE ESPACIAL

Do ponto de vista teórico-conceitual, entre as abordagens mais robustas para trabalhar com a complexidade e a heterogeneidade espacial figuram respectivamente as teorias da Hierarquia e da Dinâmica de Manchas (WU e LOUCKS, 1995; WU, 1999). A partir da integração destas duas teorias emerge um novo arcabouço teórico denominado ***Dinâmica Hierárquica de Manchas-DHM*** (*Hierarchical Patch Dynamics-HPD*), que enfatiza os

relacionamentos dinâmicos entre padrão, processo e escala, em um contexto de paisagem, apresentando-se como uma abordagem hierárquica e espacialmente explícita para estudar sistemas complexos (WU, 1999). Não é de surpreender que esta instigante abordagem teórica de tratar complexidade e heterogeneidade espacial tenha surgindo dentro do campo interdisciplinar da Ecologia de Paisagens.

Na vertente tecnológica-operacional, tendo em vista as facilidades oferecidas pelas geotecnologias, sobretudo as advindas do sensoriamento remoto e do geoprocessamento, a Ciência da Geoinformação configura-se como uma das mais promissoras linhas de atuação no sentido de permitir a integração de diferentes escalas de espaço, de tempo e de organização biológica, o que possibilitaria implementar uma abordagem que trate as relações hierárquicas inerentes à biodiversidade (LORINI *et al.*, 2005; 2007; BLASHCKE, 2006). De fato, os Sistemas Geográficos de Informação (SGI, SIG, GIS) constituem ambientes computacionais integrativos, versáteis e criativos que podem ser considerados como instrumentação de inestimável valor para a análise ambiental e ecológica (LORINI, 2001; LORINI *et al.*, 1996; 2005; 2007; XAVIER-DA-SILVA, 2001).

Não obstante, em conseqüência de todas as dificuldades anteriormente elencadas, não é de surpreender que, embora a espacialização e a passagem de escala venham sendo reconhecidas entre os mais importantes e prementes desafios das ciências da vida e da terra, existe uma grande carência de conjuntos de diretrizes ou metodologias sistemáticas de *scaling*, sobretudo quando são consideradas paisagens heterogêneas (WIENS, 1989; EHLERINGER e FIELD, 1993; KING, 1991; LEVIN, 1992; RASTETTER *et al.*,1992; JARVIS; 1995; WU e LOUCKS, 1995; STEWART *et al.*, 1996; VAN GARDINGEN *et al.*,1997; PETERSON e PARKER, 1998; WU e DAVIS, 2000).

Partindo do panorama acima exposto, a presente tese procura investigar a possibilidade de desenvolver uma abordagem integrativa, espacializada, hierárquica e

multiescalar para análises em biodiversidade, implementando uma proposta metodológica desta natureza em estudos de caso reais envolvendo elementos da biodiversidade da Floresta Atlântica.

1.1.4. OS ELEMENTOS DA BIODIVERSIDADE TOMADOS COMO ALVO DA PESQUISA

A eco-região da Floresta Atlântica constitui um dos 25 *hotspots* mundiais, ou seja, uma das regiões biologicamente mais ricas e ameaçadas do planeta , sendo considerada bioma prioritário para a conservação da biodiversidade no continente americano (MYERS *et al.*, 2000).

Em especial, este estudo trata da biodiversidade da Floresta Atlântica sobre terrenos quaternários costeiros, uma das menos conhecidas porções do bioma, apesar de sua antiga e intensa história de ocupação antrópica que remonta ao período do descobrimento do Brasil. Exemplos notáveis deste quadro foram as recentes descobertas em grupos tão conhecidos como aves e mamíferos, de uma nova espécie de primata, o mico-leão-da-cara-preta (*Leontopithecus caissara*) e de um novo gênero e espécie de ave, o bicudinho-do-brejo (*Stymphalornis acutirostris*), ambas no litoral paranaense a menos de 300 km de São Paulo, a maior metrópole da América do Sul. Descritas apenas na década passada, as duas espécies ocorrentes em ambientes quaternários já se encontram globalmente ameaçadas de extinção, o que demonstra claramente o grau de desconhecimento e de perda que caracterizam as formações cenozóicas da Floresta Atlântica.

Cabe destacar que a grande heterogeneidade natural dos ecossistemas arbóreos cenozóicos costeiros, bem como a incidência superposta de intenso e diversificado uso antrópico nesta zona, acabaram por produzir um complexo mosaico de paisagens fragmentadas que atualmente configura esta porção oriental do território brasileiro. O arcabouço geológico e geomorfológico, as mudanças climáticas e variações do nível do mar

no Quaternário, os processos pedogenéticos e biogeográficos em concerto comandaram a evolução destes diversos sistemas costeiros. Tais sistemas continuam evoluindo sob os processos naturais atuais e a este cenário são sobrepostos novos processos estruturantes dirigidos pela ação do homem, que passa a representar um poderoso agente de mudança destas paisagens. Ressalta-se que segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) mais da metade da população mundial vive em regiões costeiras, onde se desenvolvem usos diversificados que geram intensos e crescentes conflitos e problemas de degradação e contaminação. Como bem destacado por Souza (2005), as tendências evolutivas futuras em curto e longo prazo não podem ser previstas sem a compreensão dos processos de ampla escala espacial e temporal. Neste marco de complexidade, compreender a evolução geológica, paleogeográfica e biogeográfica das regiões costeiras, o que necessariamente envolve escalas espaciais regionais bem como escalas temporais de longo prazo, pode constituir poderosa ferramenta para auxiliar na solução dos conflitos e problemas acima mencionados.

Em uma perspectiva de gestão dos recursos biológicos destes ambientes, qualquer estratégia efetiva demandará uma abordagem que analise as interações entre as dinâmicas naturais dos sistemas abióticos (geólogico, geomorfológico, pedológico, climático) e bióticos (ecossistemas, espécies e populações), bem como entre estes e os sistemas socioeconômicos e culturais. Esta abordagem necessariamente exigirá um arcabouço teórico-operacional capaz de integrar a diversificada natureza dos dados e das várias escalas envolvidas, além de propiciar a elaboração de maneiras elucidativas de apoio à decisão.

Neste sentido, o primeiro estudo de caso apresentado nesta tese aborda a distribuição geográfica e o status de conservação de sistemas arbóreos quaternários costeiros da Floresta Atlântica em múltiplas escalas: (1a) escala local - amostras de comunidades; (1b) da paisagem e da região - sistemas vegetacionais do litoral norte de SC, PR e sul de SP e (1c) do bioma - sistemas arbóreos quaternários no domínio da Mata Atlântica. O segundo estudo de

caso envolve a distribuição e status de conservação do mico-leão-da-cara-preta (*Leontopithecus caissara*), um dos 25 primatas mais ameaçados do mundo (MITTERMEIER *et al*., 2006), sendo executado em múltiplas escalas, a saber: (2a) escala local - manchas de hábitat, (2b) da paisagem - manchas das populações e (2c) da região até a do bioma – redes de populações e distribuição da espécie.

1.2. Objetivos gerais da pesquisa

Dentro do contexto de escassez de roteiros metodológicos que possibilitem lidar com a complexidade de sistemas ambientais em abordagens espacializadas, a presente tese tem como objetivo geral *desenvolver um arcabouço metodológico integrativo, espacialmente explícito, hierárquico e multiescalar para análises de padrões e processos que configuram a distribuição e a persistência de ecossistemas, espécies e populações em paisagens heterogêneas.*

Ao longo da elaboração desta tese adotou-se a diretriz de investigar a viabilidade da implementação de uma abordagem DHM/SGI (Dinâmica Hierárquica de Manchas / Sistema Geográfico de Informação) como instrumento para tratar temas referentes à distribuição geográfica e ao status de conservação de elementos da biodiversidade.

Tomando como alvo elementos bióticos em sistemas quaternários costeiros da Mata Atlântica, a proposta metodológica desenvolvida nos dois estudos de caso desta tese propôs-se a demonstrar a aplicabilidade da abordagem integrativa DHM/SGI como arcabouço cientificamente embasado para trabalhar com passagem de escalas e paisagens complexas.

Do ponto de vista metodológico-operacional, buscou-se investigar se a teoria da Dinâmica Hierárquica de Manchas implementada através de geoprocessamento, em ambiente

de Sistema Geográfico de Informação (SGI), poderia ainda fornecer um arcabouço adequado para integrar novos métodos avançados da Geocomputação, da Inteligência Artificial, da Ecoinformática e de modelagem geográfica e ecológica. Neste caso, a implementação desta abordagem integrada e espacializada poderia auxiliar na operacionalização de conceitos e noções oriundas da Biogeografia, da Ecologia de Paisagem e da Biologia da Conservação, contribuindo asssim para o entendimento e para o apoio à decisão em questões relativas à biodiversidade.

1.3. Hipóteses gerais da pesquisa

1. *A distribuição geográfica de elementos da biodiversidade como ecossistemas, espécies e populações pode ser entendida como um sistema complexo, apresentando portanto configurações de arranjamentos em multiescala e organização em subsistemas hierárquicos.*

   1a - H_0: A distribuição geográfica dos elementos da biodiversidade apresenta um caráter uniforme ou aleatório ao longo de escalas espaço-temporais e de organização biológica.

   1a - H_1: A distribuição geográfica dos elementos da biodiversidade apresenta-se organizada em agregados ao longo de escalas espaço-temporais e de organização biológica.

   1b – H_0: Modelos baseados em métodos mais flexíveis e/ou não-lineares, baseados em aprendizado de máquina, não apresentam melhor performance na modelagem de distribuição de elementos da biodiversidade.

1b – H_1: Modelos baseados em métodos mais flexíveis e/ou não-lineares, baseados em aprendizado de máquina, apresentam melhor performance na modelagem de distribuição de elementos da biodiversidade.

2. *A distribuição geográfica de elementos da biodiversidade de sistemas quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica reflete efeitos de mudanças climáticas e de nível do mar ocorridas sobretudo desde o Holoceno Médio.*

2a – H_0: A distribuição geográfica de elementos da biodiversidade atualmente presentes em sistemas quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica não se apresenta correlacionada à configuração de terrenos definida a partir do Holoceno Médio.

2a – H_1: A distribuição geográfica de elementos da biodiversidade atualmente presentes em sistemas quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica apresenta-se correlacionada à configuração de terrenos definida a partir do Holoceno Médio.

3. *O entendimento da distribuição e permanência de elementos da biodiversidade em paisagens complexas pode ser auxiliado pela utilização de arcabouços integrativos e espacializados de investigação.*

3a – H_0: A implementação de um arcabouço DHM/SGI não permite a integração e passagem de escala espacial, temporal e organizacional em análises de distribuição e status de conservação de elementos da biodiversidade.

3a – H_1: A implementação de um arcabouço DHM/SGI permite a integração e passagem de escala espacial, temporal e organizacional em análises de distribuição e status de conservação de elementos da biodiversidade.

3b – H_0: A abordagem DHM/SGI não facilita a integração de novos métodos e técnicas de Inteligência Artificial, Geocomputação e Ecoinformática em análises de distribuição de elementos da biodiversidade.

3b – H_1: A abordagem DHM/SGI facilita a integração de novos métodos e técnicas de Inteligência Artificial, Geocomputação e Ecoinformática em análises de distribuição de elementos da biodiversidade.

1.4. Organização da tese

A estrutura desta tese procura traduzir as principais etapas do processo de investigação realizado (fig. 1.1). A primeira etapa, que congrega os três primeiros capítulos da tese, consitiu no levantamento das problemáticas consideradas essenciais ao tratamento do tema, de modo a otimizar o enquadramento do problema e a fundamentação téorica e metodológica para o desenvolvimento da pesquisa.

O presente capítulo apresenta o delineamento geral da tese, procurando fornecer uma visão geral do trabalho em termos de sua motivação e problemática, tratando dos temas das mudanças ambientais e do conseqüente imperativo da predição ecológica, assim como das peculiaridades do tratamento da complexidade, da escala e da heterogeneidade espacial. O escopo do trabalho desenha-se a partir da definição dos elementos da biodiversidade tomados como alvo da pesquisa, bem como dos objetivos e hipóteses gerais adotadas.

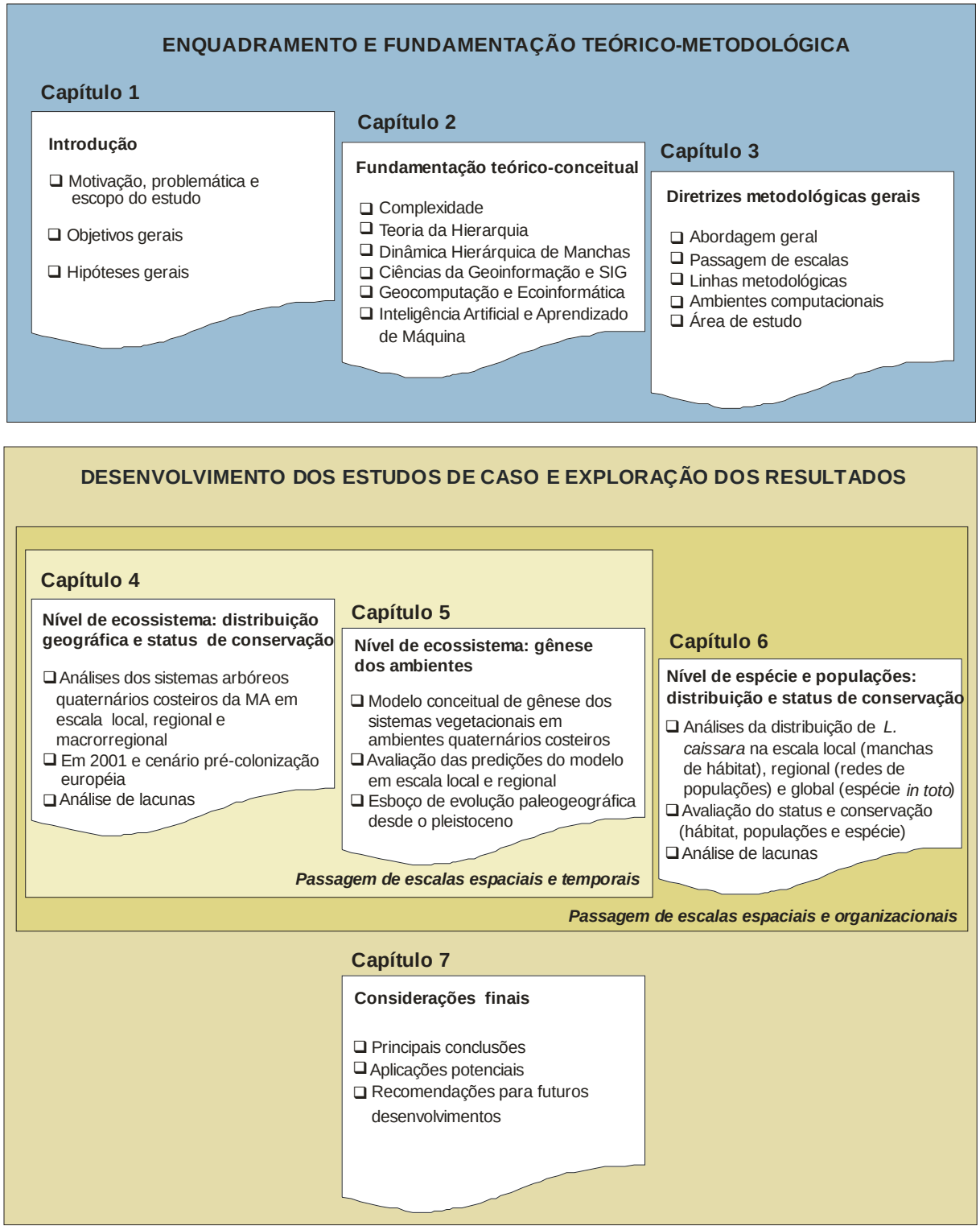


Figura 1.1. Etapas da investigação e organização da tese.

O capítulo 2 trata dos temas teóricos e conceituais que fundamentam o desenvolvimento desta tese, elencando as características dos sistemas complexos e das ciências da complexidade, discutindo sobre a noção de escala e a problemática de passagem de escala e apresentando a Teoria da Hierarquia e sua derivação espacialmente explícita via abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas. Também fornece definições de termos relacionados às Ciências da Geoinformação e aos Sistemas Geográficos de Informação, bem como apresenta os campos interdisciplinares emergentes de Geocomputação e Ecoinformática, incluindo uma breve introdução das áreas correlatas de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina.

No capítulo 3 são desenhadas as linhas metodológicas gerais adotadas na pesquisa, iniciando por uma descrição da abordagem geral do trabalho, delineando as diretrizes metodológicas envolvidas na passagem de escalas e definindo as linhas metodológicas e ambientes computacionais relacionados a geoprocessamento e Sistemas Geográficos de Informação. A abrangência geográfica do trabalho é definida no capítulo pela caracterização dos recortes territoriais que representam a área de estudo analisada na tese.

Definido o quadro teórico-metodológico, teve início a segunda etapa do trabalho, que compreendeu o desenvolvimento da abordagem integrativa e multiescalar para análises da biodiversidade nos dois estudos de caso, que envolveram sistemas quaternários costeiros da Mata Atlântica. Estes desenvolvimentos e a exploração dos resultados obtidos correspondem aos quatro últimos capítulos do corpo principal da tese.

Para permitir um leitura independente, os capítulos 4, 5 e 6, que constituem os estudos de caso, foram elaborados com uma estrutura que conta com seções particulares de introdução, objetivos, hipóteses, materiais e métodos, resultados, discussões e conclusões.

O capítulo 4 apresenta um estudo da distribuição dos sistemas arbóreos do quaternário costeiro do Domínio da Mata Atlântica, adotando uma abordagem que explora múltiplas

escalas espaciais, em dimensão temporal histórica e atual e em nível de organização de ecossistema. Neste primeiro estudo de caso, um arcabouço espacialmente explícito, baseado na Dinâmica Hierárquica de Manchas e construído em ambiente de Sistema Geográfico de Informação, é utilizado para analisar a temática da cobertura do solo através de procedimentos de sensoriamento remoto, geoprocessamento e ecoinformática. As análises abordam desde a escala local, de paisagem, de região (sistemas vegetacionais do litoral norte de SC, PR e sul de SP) até a de bioma (sistemas arbóreos quaternários no domínio da Mata Atlântica). Na escala macrorregional de bioma as análises envolvem duas escalas temporais, um cenário retrospectivo pré-colonização européia e a situação atual em 2001.

Também em nível de ecossistema, a abordagem do capítulo 5 enfatiza o tratamento da dimensão temporal, passando por escalas temporais desde o presente até o pretérito geológico. Nesta segunda parte do primeiro estudo de caso foi elaborado um modelo conceitual de gênese dos sistemas vegetacionais de ambientes quaternários para o recorte do litoral do Brasil, sendo que as predições de distribuição derivadas do modelo são avaliadas em escala de paisagem regional e local, com o auxílio de procedimentos de geoprocessamento. Esboços locais da evolução paleogeográfica dos ambientes litorâneos são também desenvolvidos pela compilação de informação geológica e palinológica, passando pelas escalas de tempo desde o pleistoceno até o presente.

Nas duas partes do primeiro estudo de caso (capítulos 4 e 5) a abordagem dirigiu a ênfase para o tratamento de múltiplas escalas espaciais e temporais. Já no segundo estudo de caso desenvolvido nesta tese, correspondente ao capítulo 6, a ênfase desloca-se para o tratamento de múltiplas escalas de espaço e de nível de organização biológica. O capítulo 6 envolve análises de distribuição geográfica e status de conservação em nível de organização biológica de espécie e populações, abordando a sua distribuição do mico-leão-da-cara-preta

(*Leontopithecus caissara*) desde a escala local (manchas de hábitat), de paisagem (manchas de população), de região (rede de populações) até a global (espécie *in toto*).

Por fim, o capítulo 7 encerra o corpo principal da tese, apresentando considerações finais em termos das principais conclusões gerais alcançadas pelo trabalho, bem como das aplicações potenciais das abordagens desenvolvidas e das recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação teórico-conceitual

Without generalization, there can be no theory. Without theory, explanation is highly limited if not impossible. If each place is entirely unique then there can be no generalizations, no geographic theory, no anticipation...
But if we believe there are commonalities...
the door is open for geographic theory.

Grant Ian Thrall

In biological systems, pattern and process make little sense without consideration of scale.

Jianguo Wu, K. Jones, Harbin Li , Orie Loucks

Neste capítulo são apresentadas explanações sobre temas teóricos e conceituais que fundamentam o desenvolvimento desta tese, sendo que, em linhas gerais, o texto está organizado da maneira listada a seguir. Na seção 2.1. são elencadas características dos sistemas complexos e das ciências da complexidade. A seção 2.2 discute a noção de escala e a problemática de passagem de escala. O item 2.3 trata da Teoria da Hierarquia e a seção 2.4 apresenta a sua derivação espacialmente explícita via abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas. Na seção 2.5 são definidos termos referentes às Ciências da Geoinformação e ambientes de Sistemas Geográficos de Informação. O item 2.6 apresenta os campos interdisciplinares emergentes de Geocomputação e Ecoinformática, enquanto a seção 2.7 fornece uma breve introdução das áreas de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina, às quais os dois primeiros estão fortemente relacionados.

2.1. Sistemas complexos

A complexidade de um sistema geralmente está relacionada ao número dos componentes do sistema e suas interrelações, bem como a vários fatores associados ao observador (WU, 1999). Assim sendo, um conceito abrangente de complexidade deve levar em consideração tanto as propriedades do sistema quanto as percepções, interesses e capacidades do observador. Embora exista uma tendência de que sistemas complexos apresentem um grande número de componentes, de fato são as interações complexas entre estes componentes que acabam por dificultar o tratamento deste tipo de sistema.

Segundo Weaver (1948) três classes de complexidade podem ser identificadas em termos da estrutura do sistema: a simplicidade organizada, a complexidade organizada e a complexidade desorganizada. Tais classes correspondem aos grupamentos de Weinberg (1975), definidos respectivamente como sistemas de número pequeno, médio e grande. A simplicidade organizada, ao caracterizar sistemas com um número menor de componentes significantes interagindo de forma determinística, pode ser tratada prontamente pela matemática analítica. Já a complexidade desorganizada, que se configura quando sistemas apresentam um grande número de componentes e um alto grau de aleatoriedade de comportamento, pode ser tratada de modo eficaz pelo uso de métodos estatísticos convencionais.

Contudo, é tácito que a maioria dos sistemas de interesse para as ciências biológicas e ambientais constituem sistemas de número médio, justamente aqueles caracterizados pela complexidade organizada (ALLEN e STARR, 1982; O'NEILL *et al*., 1986; FLOOD,1987). Por um lado estes sistemas têm vários componentes interatuantes e apresentam comportamento freqüentemente não determinístico, o que está além do limite de alcance da matemática analítica. Por outro lado, o emprego de tratamento estatístico tradicional para tais

sistemas também não se justifica , tendo em vista o número inadequado de componentes e a falta de aleatoriedade de comportamento. Conseqüentemente, como ainda não há disponibilidade de métodos quantitativos eficazes para deslindar a complexidade organizada, surge a necessidade de, quando possível, converter sistemas de números médios em sistemas de números pequenos, ou de desenvolver novos métodos que apresentem características fundamentais distintas dos procedimentos matemáticos e estatísticos bem estabelecidos (WU, 1999).

O enfrentamento destes desafios representa uma das motivações do desenvolvimento das ciências de sistemas, que com sua ênfase em processos e dinâmicas sistêmicas tem sido uma abordagem poderosa e bem sucedida para tratar com interações não-lineares e retroalimentações complexas na engenharia, bem como em sistemas sociais, econômicos e ecológicos (WEINBERG, 1975; FLOOD e CARSON,1993; WU, 1999).

Segundo Simon (1996) podem ser reconhecidos três pulsos distintos no interesse por complexidade e sistemas complexos no século XX, sendo que o primeiro destes teve início após a Primeira Guerra Mundial e pode ser associado aos termos “holismo” e “Gestalts”, que apresentavam uma forte tendência anti-reducionista.

Caracterizado por termos tais como “teoria geral de sistemas” (BERTALANFFY, 1986; BOGDANOV, 1980; BUNGE, 1977; UYEMOV, 1975), “teoria da informação” (SHANNON e WEAVER, 1975), “cibernética” e “teoria de controle” (WINER, 1948; ASHBY, 1956; FRANÇOIS, 1999), o segundo pulso, que pode ser traçado a partir do período que se segue à Segunda Guerra Mundial, focalizou sobretudo o papel das retroalimentações e da homeostase na manutenção da estabilidade dos sistemas.

O terceiro movimento de interesse pelos sistemas complexos têm como foco principal os mecanismos que criam e sustentam a complexidade, assim como os métodos que permitam descrevê-la e analisá-la de forma eficaz. A partir daí emergiram visões alternativas sobre

complexidade que podem ser identificadas com linhas de investigação como “caos” , “catástrofes”, “fractais”, “autômatos celulares”, “algoritmos genéticos” e “hierarquia”. Várias outras linhas poderiam ser adicionadas à lista de Simon (1996) (ver também BARYAM, 1997), entre as quais podem ser listadas: “conexionismo”, “semiótica”, “inteligência artificial e computacional”, “lógica e sistemas nebulosos ou fuzzy”, “mecânica estatística não-extensiva”, “estatística bayesiana”, “métodos numéricos multiescala e grupos de renormalização”, “atratores”, “criticalidade auto-organizada”, “autopoiese”, “estruturas dissipativas”, “panarquias e ciclos adaptativos”, “sistemas adaptativos complexos e modelagem multi-agentes” e “enformia”. Na atualidade estes múltiplos ramos de pesquisa desenvolvidos em várias disciplinas vêm mostrando uma tendência convergente em direção a um campo interdisciplnar emergente, por vezes intitulado de ciências da complexidade.

Dentre estas linhas de investigação acima elencadas, as seguintes são de interesse direto da presente tese: a teoria da hierarquia e sua implementação espacializada via Dinâmica Hierárquica de Manchas e Sistemas Geográficos de Informação; a inteligência artificial e computacional em seu ramo de desenvolvimento de aprendizagem de máquina; o conexionismo e sua derivação de Redes Neurais Artificiais (ver Capítulo 4); a estatística bayesiana e a mecânica estatística na implementação de algoritmos de Máxima Entropia (ver Capítulo 6); a semiótica no contexto de paisagem cognitiva e no conceito de eco-campo (ver Capítulo 6).

Em termos conceituais, Lucas (2007) propõe que uma teoria da complexidade poderia apontar para o seguinte enunciado dirigido aos sistemas complexos: “os componentes do sistema, interagindo de maneira crítica, são capazes de se auto-organizar para formar estruturas potencialmente evolutivas, configurando uma hierarquia de propriedades emergentes do sistema” (figura 2.1). Os elementos de sua definição relacionam-se às seguintes assertivas:

Interação crítica: o sistema é rico em informação, não sendo estático nem caótico.

Configuração dos componentes: o comportamento das partes implica modularidade e autonomia.

Auto-organização: a estrutura do atrator do sistema é gerada por interações contextuais locais.

Evolução potencial: as variações ambientais selecionam e mudam os atratores do sistema.

Hierarquia: múltiplos níveis de estrutura e respostas aparecem no sistema (hiperestrutura).

Emergência: novas características e propriedades emergem em diferentes agregações do sistema, que não são feições apresentadas ao nível das partes componentes.

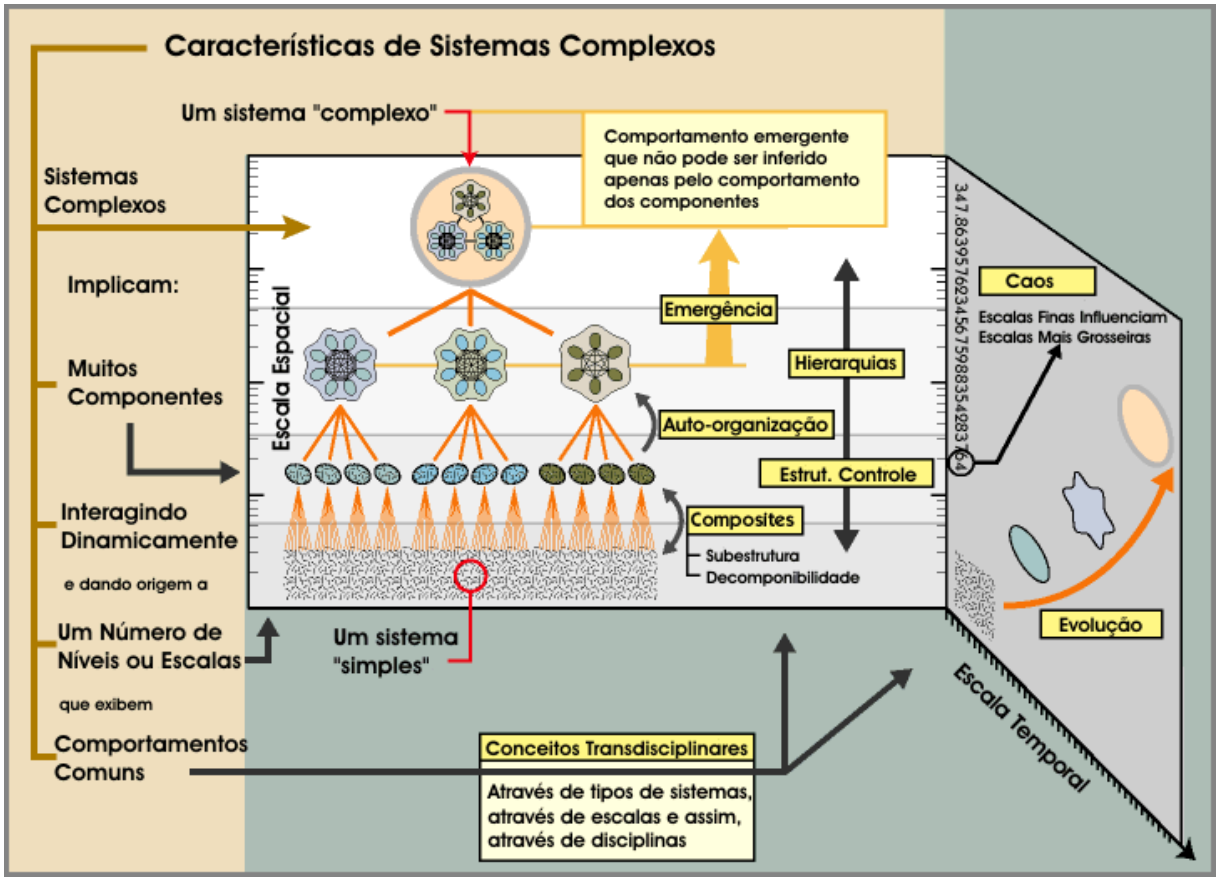


Figura 2.1. Representação esquemática de um sistema complexo. Fonte: Adaptado de Clemens (2005).

Sistemas complexos são termodinamicamente abertos, muitas vezes compostos por um grande número de componentes diversos que interagem de modo não-linear e que freqüentemente exibem retardo de resposta e retroalimentações (LEVIN, 1999; WU, 1999; WU e MARCEAU, 2002). Por conseqüência, sistemas complexos são caracterizados por propriedades emergentes e organização em múltiplas escalas (ALLEN e STARR, 1982; WU, 1999; WU e MARCEAU, 2002).

Cabe então seguir o desenvolvimento do texto com a apresentação de algumas considerações acerca da noção de escala.

2.2. Escala

A noção de escala é um conceito essencial em ciências naturais e sociais, tendo sido definida de várias maneiras distintas (GIBSON *et al*., 1998; VAN GARDINGEN, 1997; PETERSON e PARKER, 1998; MARCEAU, 1999; WITHERS e MEENTEMEYER, 1999; JENERETTE e WU, 2000; WU e QI, 2000). Em especial, a literatura geográfica é particularmente rica em discussões acerca da importância da escala nas representações científicas do mundo (MEENTEMEYER, 1989; FERRAS, 1992; MARCEAU, 1999).

Uma concepção bastante instigante foi proposta por Allen e Starr (1982), onde escala é entendida como a parametrização de nossa janela de percepção da realidade, podendo ser definida como o período de tempo e espaço sobre o qual sinais são integrados para dar uma mensagem.

Em recente revisão desta temática, Wu e Li (2006) propuseram um interessante arcabouço conceitual tripartite para organizar definições de escala, que consiste das *dimensões*, *tipos* e *componentes* de escala (figura 2.2). As colocações principais deste arcabouço serão sumarizadas a seguir.

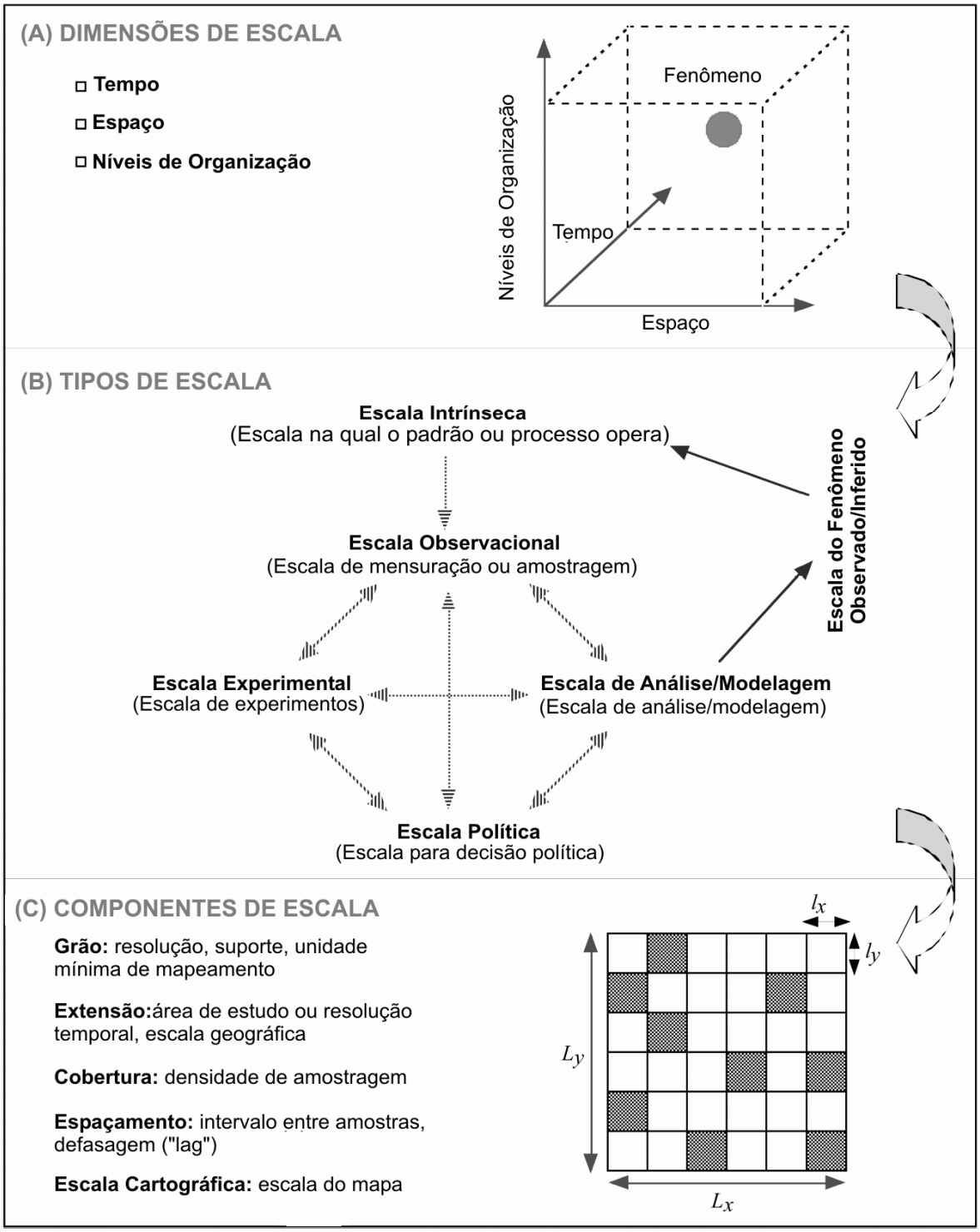


Figura 2.2. Representação hierárquica de conceitos de escala: (A) dimensões da escala; (B) tipos de escala e (C) componentes de escala. Fonte: Adaptado de Wu e Li (2006).

2.2.1. DIMENSÕES DE ESCALA

Com relação à escala, podem ser distinguidas três dimensões principais, *espaço*, *tempo* e *nível organizacional*, sendo que as duas primeiras constituem os eixos fundamentais da escala, ao passo que as agregações organizacionais via de regra são construídas pelo observador.

O *espaço* constitui a dimensão fundamental na qual entidades grandes e pequenas podem ser distinguidas, bem como suas configurações podem ser discernidas. Já o *tempo* representa a dimensão fundamental que permite distinguir os eventos rápidos e freqüentes daqueles lentos e infreqüentes. A *dimensão organizacional*, por sua vez, representa uma ordenação direcional de entidades que interagem e que apresentam distintas taxas de processos, resultando na formação de níveis diferentes. Como as organizações ecológicas existem no espaço e no tempo, os níveis sempre correspondem a certas escalas espaciais e temporais (WU, no prelo).

2.2.2. TIPOS DE ESCALA

Segundo Wu e Li (2006) vários tipos de escala podem ser distinguidos baseados em quaisquer das três dimensões da escala. A es*cala intrínseca* refere-se à escala na qual um padrão ou processo realmente opera, a qual é semelhante, porém mais ampla que o conceito de *escala de processo*, termo freqüentemente usado em geociências. Há vários outros tipos de escala não intrínsecos ao fenômeno de interesse, tais como *escala de observação* (*escala de amostragem* ou *escala de medidas*), a *escala experimental*, a *escala de análise* ou *escala modelar*. No contexto da gestão e do planejamento ambiental, leis e regulamentos locais, regionais e nacionais introduzem outro tipo de escala - a *escala política*, que é influenciada por um conjunto de fatores econômicos, políticos e sociais. Com propriedade os autores supracitados destacam que estes diferentes tipos de escala estão relacionados entre si de vários

maneiras, sendo que em geral, somente quando as escalas de observação e de análise forem corretamente escolhidas será possível detectar de maneira apropriada a escala característica do fenômeno de interesse; apenas quando as escalas de experiências e modelos forem apropriadas poderão os resultados destas experiências e modelos apresentar relevância; só quando a escala de implementação de políticas for proporcional à escala intrínseca do problema em questão poderão as políticas atingir eficácia. Na realidade, tipos diferentes de escalas podem divergir até para o mesmo fenômeno, resultando no problema de desacordo de escala (ou discordância de escala). Retificar tal desacordo de escala ou relacionar um tipo de escala a outro normalmente envolve a transferência de escala ou *scaling*.

2.2.3. COMPONENTES DE ESCALA

Uma compreensão adequada da relação entre os diferentes tipos de escala invoca as definições de componentes de escala. Embora as noções de dimensões e tipos de escala sejam úteis como conceitos gerais, necessita-se de definições mais específicas e mensuráveis quantificar a escala e desenvolver as relações para a passagem de escalas. Tais definições deriam os *componentes de escala*, que incluem *escala cartográfica*, *grão*, *extensão*, *cobertura* e *espaçamento*.

A *escala cartográfica* tradicional (ou *escala de mapa*) é a razão entre a distância no mapa e a distância real na superfície da terra. A escala cartográfica é essencial para a criação e o uso de mapeamentos.

Dois componentes básicos da escala consistem nas noções de *grão* e *extensão*. O g*rão* representa a unidade de mais fina resolução de um fenômeno ou de um conjunto de dados dentro da qual presume-se homogeneidade. O grão pode ser considerado como o tamanho do pixel para dados matriciais ou a unidade mínima de mapeamento para dados vetoriais. Já a *extensão* consiste na total expansão espacial ou temporal de um estudo, sendo que uma

expressão equivalente à extensão é *escala geográfica,* que foi definida por LAM e QUATTROCHI (1992) como o tamanho de um mapa específico. Tanto grão como extensão são de grande importância no estudo de paisagens heterogêneas.

A noção de *cobertura,* que não deve ser confundida com extensão, refere-se à intensidade de amostragem no espaço ou no tempo, enquanto *espaçamento* é o intervalo ou espaço entre duas amostras adjacentes.

2.2.4. A PROBLEMÁTICA DA ESCALA

A seriedade da problemática da escala foi sublinhada pela primeira vez na década de 1930 por geógrafos humanos e cientistas sociais, sendo que a variabilidade em resultados estatísticos originados do uso de diferentes escalas ou níveis de agregação já foi demonstrada por Gehlke e Biehl em1934. Duas décadas mais tarde McCarthy *et al*. (1956) afirmaram que "na investigação geográfica é evidente que não se deve esperar que conclusões obtidas em estudos feitos em uma escala apliquem-se a problemas cujos dados são expressos em outras escalas... cada modificação na escala ocasionará a afirmação do novo problema e não há base para supor que as associações que existem em uma escala existam também na outra".

Segundo a revisão de Marceau (1999), o próximo passo significante no reconhecimento do problema de escala foi feito por Openshaw (1977; 1978; 1981; 1984a; b) e Openshaw e Taylor (1979; 1981), que descrevem o que se costuma denominar "Problema da Unidade de Área Modificável" (*Modifiable Areal Unit Problem - MAUP*). O MAUP surge em decorrência de existirem inúmeras maneiras distintas pelas quais uma área geográfica de estudo pode ser dividida em unidades de área não-sobrepostas para propostas de análise espacial. Tendo em vista que normalmente o principal critério utilizado na definição destas unidades deriva das exigências operacionais do estudo, por conseqüência destas unidades espaciais podem não tem qualquer significação geográfica intrínseca. Portanto, se as unidades

de área são arbitrárias e modificáveis, então o valor de qualquer trabalho baseado sobre elas pode não possuir qualquer validade independente das unidades que estão sendo estudadas. O MAUP abrange dois componentes denominados como problema de escala e problema de agregação. O primeiro representa a variação em resultados que podem ser obtidos quando os dados adquiridos de unidades de área são progressivamente agregados em um número menor de unidades maiores, enquanto o último refere-se à variação em resultados produzidos pelo uso de combinações alternativas de unidades de área em escalas semelhantes (MARCEAU, 1999).

A questão dos efeitos de escala pode ser explicada em termos de multiplicidade de escala, escalas características e hierarquia, contudo, tais efeitos podem também constituir artefatos devidos a erros de amostragem e mensurações, distorções de reamostragem de dados ou falhas de análise estatística e modelagem (JELINSKI e WU, 1996; WU, 2004; WU e LI, 2006). A existência de escalas características e de efeitos de escala está inerentemente relacionada à questão de passagem de escala (WU e LI, 2006).

2.2.5. PASSAGEM DE ESCALA ("*SCALING*")

Uma definição mais geral e amplamente aceita de ***passagem de escala*** ("*scaling")* seria a de tradução da informação entre ou ao longo de escalas espaciais, temporais ou organizacionais (TURNER *et al*., 1989; KING, 1991; BLÖSCHL e SIVAPALAN, 1995; STEWART *et al*., 1996; VAN GARDINGEN *et al*., 1998; WU, 1999; WU e LI, 2006; BIERKENS *et al*., 2000; GARDNER *et al*., 2001)

Os procedimentos de passagem de escala podem ser distinguidos em dois grupos, com base na direcionalidade da operação: (1) o procedimento ascendente (*scaling up* ou *upscaling*), que traduz informação de escalas mais finas (com tamanhos menores de grão ou extensão) para escalas mais grosseiras (com tamanhos maiores de grão e extensão) e (2) o

procedimento descendente (*scaling down* ou *downscaling*), que traduz informação de escalas mais amplas para escalas mais detalhadas.

As três operações básicas utilizadas na passagem de escala consistem em variar a extensão, o tamanho do grão ou a cobertura (WU e LI, 2006). O procedimento de *extrapolação* consiste em transferir informação de extensões menores para maiores. A mudança de grão consiste em *tornar mais grosseira a resolução* através da transferência de informação para tamanhos crescentes de grão ou ainda *refinar a resolução* transferindo informação para tamanhos decrescentes de grão. Para lidar com conjuntos de dados espaciais que não apresentam 100% de cobertura, pode ser necessário estimar valores para localizações espaciais que não foram mensuradas, partindo da informação de outros locais que foram mensurados, sendo que este processo é chamado de *interpolação*. O processo inverso da interpolação é denominado de *amostragem*. Em termos operacionais, a passagem de escala espacial é realizada através de sete procedimentos básicos, onde três constituem as operações básicas anteriormente citadas e outros quatro representam diferentes combinações do trio fundamental (figura 2.3) (BIERKENS *et al*. 2000; WU, no prelo).

Na prática, as três operações básicas podem ser necessárias em um único projeto de *scaling*, quer dizer, diferentes métodos para extrapolação, interpolação e amostragem podem ser empregados simultaneamente para alcançar os objetivos gerais de passagem de escala (WU, 2006). De um modo geral, para tornar o conceito de escala operacional é necessário ser específico sobre os componentes da escala (escala cartográfica, grão, extensão, cobertura, e espaçamento), uma vez que qualquer abordagem espacial de passagem de escala envolverá, inevitavelmente, uma ou mais das três operações básicas de *scaling* (WU e LI, 2006).

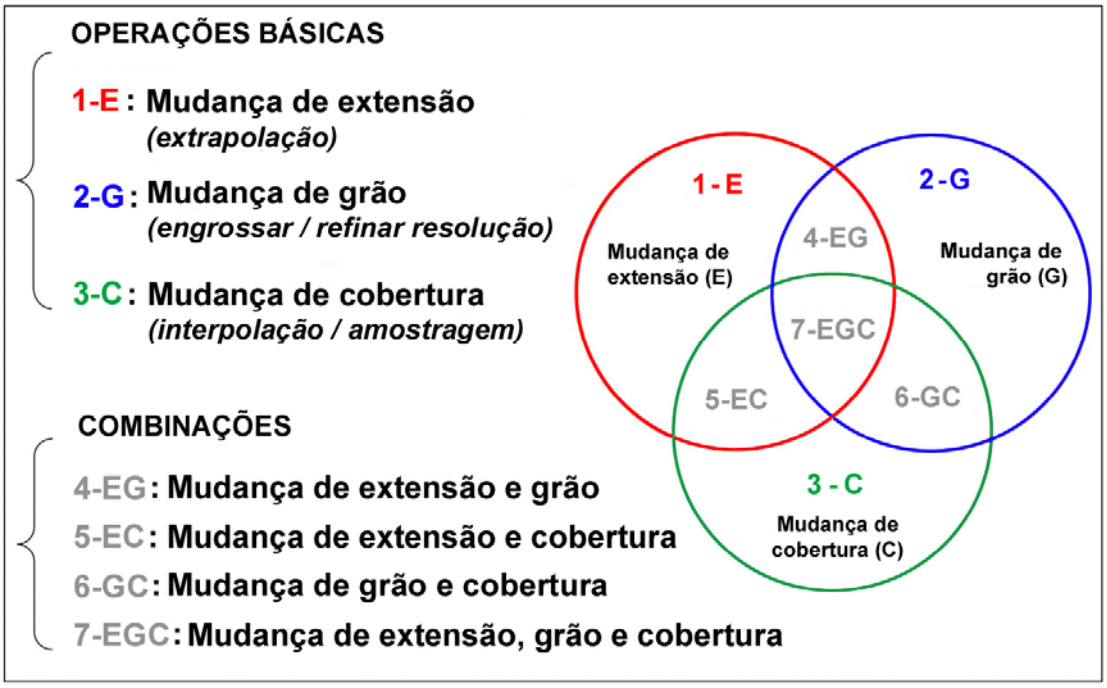


Figura 2.3. Representação esquemática dos sete tipos diferentes de operações de passagem de escala. Fonte: Adaptado de Wu (no prelo).

Tendo em vista que uma das abordagens consideradas adequadas para tratar os efeitos de escala sobre a organização de sistemas tem sido a Teoria da Hierarquia (SIMON, 1974; 1996; WU, 1999; 2006; PETERSON, no prelo), seguem-se algumas explanações sobre a temática.

2.3. Teoria da Hierarquia

A *teoria da hierarquia* constitui uma extensão da teoria de sistemas, representando uma abordagem que tem como meta analisar os efeitos de escala sobre a organização de sistemas complexos (SIMON, 1974; PETERSON, no prelo).

Para Simon (1996) as vertentes que compõem o terceiro momento de interesse em sistemas complexos (ver item 2.1 acima) enfatizam diferentes aspectos da complexidade e podem ser percebidas tanto como estratégias alternativas quanto como complementares à teoria da hierarquia. Na concepção de Wu (1999; 2006), ainda que todas estas linhas sejam de grande utilidade para entender fenômenos ao longo das escalas, é a teoria da hierarquia que pode fornecer o necessário arcabouço conceitual para desenvolver teorias e abordagens que sejam bem sucedidas em transitar através das escalas. Nesta mesma direção, Parrot (2002) destaca que a teoria da complexidade difere de outras abordagens analíticas pelo fato de basear-se em um modelo conceitual onde entidades existem em uma hierarquia de níveis organizacionais interrelacionados. Assim sendo, enquanto em abordagens convencionais os sistemas são descritos em apenas um nível de organização, no arcabouço da teoria da complexidade os relacionamentos entre sistemas em diferentes níveis hierárquicos podem ser acomodados.

A *teoria da hierarquia* surgiu da necessidade de se lidar com a complexidade através de estudos em uma variedade de disciplinas, incluindo economia, psicologia, biologia, ecologia e ciência de sistemas (SIMON, 1962; 1973; KOESTLER, 1967; WEISS, 1971; PATTEE, 1973; MILLER, 1978; ALLEN e STARR, 1982; SALTHE,1985; O'NEILL *et al.*, 1986; AHL e ALLEN,1996). Em termos gerais, uma hierarquia pode ser definida como *uma ordenação parcial* de entidades (SIMON, 1973; WU, 1999). Com grande discernimento, Simon (1962) já apontava que a complexidade com freqüência toma a forma de hierarquia, sendo que um sistema complexo consiste de subsistemas inter-relacionados que, por sua vez, são compostos de seus próprios subsistemas e assim sucessivamente, até que o nível dos componentes elementares ou "primitivos" seja alcançado (WU, 1999). Na literatura da teoria da hierarquia, os subsistemas que compõem um *nível* são normalmente chamados de *hólons* (KOESTLER, 1967). É importante notar que os níveis na hierarquia tradicional de

organização ecológica (indivíduo-população-comunidade-paisagem-ecossistema-bioma-biosfera) são definicionais e não reúnem necessariamente critérios escalares, ou seja, não estão necessariamente arranjados em seqüência ao longo das escalas espaciais ou temporais (ALLEN e HOEKSTRA, 1992; AHL e ALLEN,1996; O'NEILL e KING, 1998). Neste sentido é bem destacado que os princípios da teoria da hierarquia normalmente só se aplicam a hierarquias escalares, que via de regras são aninhadas, não sendo portanto adequados para hierarquias não escalares ou definicionais. De acordo com a teoria hierárquica, sistemas complexos apresentam uma estrutura *vertical* composta de *níveis*, bem como uma estrutura *horizontal* que consiste de *hólons* (figura 2.4).

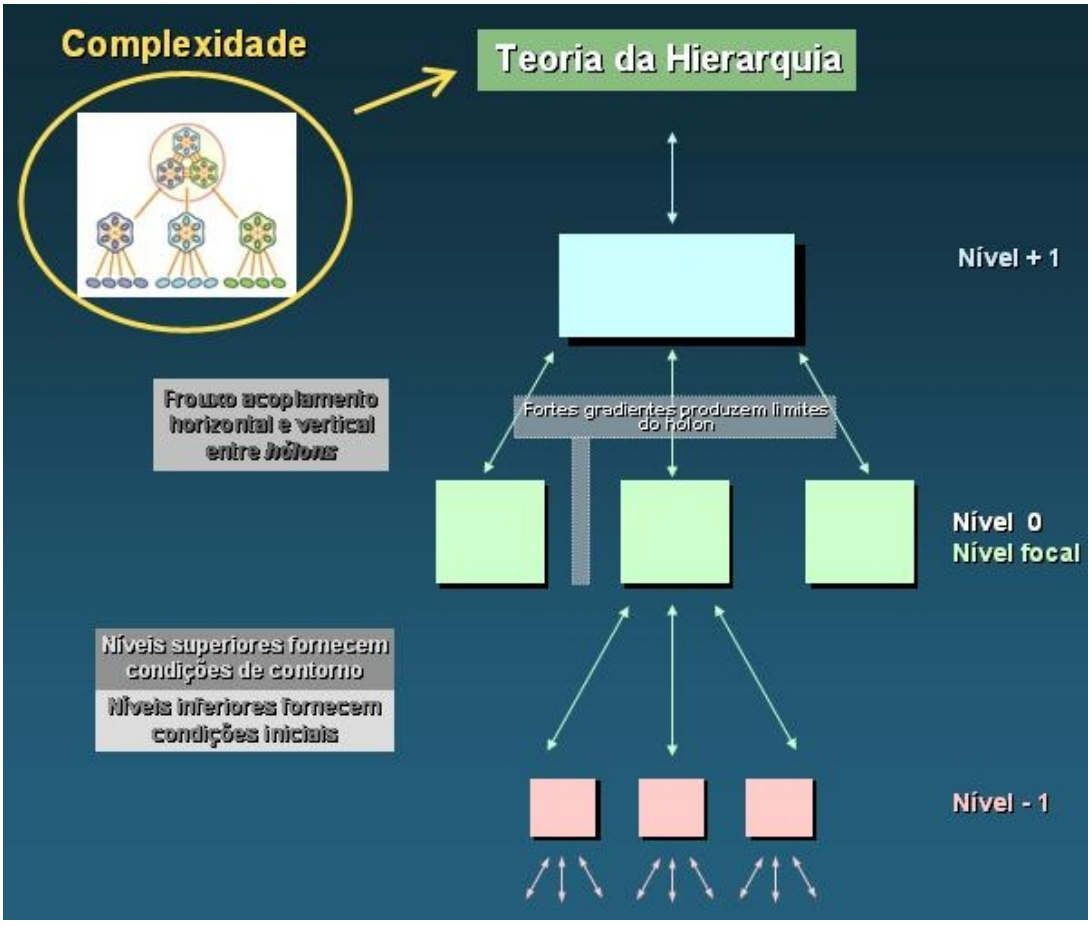


Figura 2.4. Representação esquemática de sistemas de acordo com a teoria hierárquica.

Os níveis hierárquicos são separados, fundamentalmente, por diferentes taxas características de processos, tais como freqüências de comportamento, tempo de relaxação, de ciclo ou de resposta (ALLEN e STAR, 1982). Níveis superiores na hierarquia são caracterizados por entidades mais lentas (ou eventos de baixa freqüência), enquanto níveis inferiores são representados por entidades menores e mais rápidas (ou eventos de alta freqüência). De modo geral, a relação entre dois níveis adjacentes é assimétrica, sendo que o nível superior exerce restrições (como por exemplo, condições de contorno) ao nível inferior, ao passo que o inferior supre condições de início para o nível superior (WU, 1999). Por outro lado, a relação entre os subsistemas (hólons) em cada nível é relativamente simétrica, uma vez que estes interagem em ambas as direções. As interações entre componentes dentro do mesmo hólon são mais fortes e mais freqüentes do que aquelas entre distintos hólons. Estas características da estrutura hierárquica podem ser explicadas em virtude do *frouxo acoplamento vertical*, que permite a distinção entre os níveis, bem como do *frouxo acoplamento horizontal*, que possibilita separação entre subsistemas (hólons) em cada nível (SIMON, 1973).

A existência de frouxos acoplamentos verticais e horizontais é a razão fundamental para o decomponibilidade de sistemas complexos, ou seja, a viabilidade de um sistema ser desmembrado em níveis e holons, sem perda significante de informação. A decomposição do sistema, isto é, o processo de separar e ordenar componentes de sistema de acordo com suas escalas temporais e espaciais, constitui um dos princípios mais essenciais da teoria da hierarquia (WU, 1999). Enquanto a palavra “frouxo”' sugere “decomponível”, o termo “acoplamento” implica interações entre componentes. A completa decomponibilidade só acontece quando interações entre componentes não existem, de maneira que sistemas complexos são normalmente quase decomponíveis (SIMON, 1962; 1973). Segundo o princípio da decomposição, para um determinado estudo focado em um nível particular,

restrições oriundas de níveis superiores são expressas como constantes, condições de contorno ou funções diretivas, enquanto que as dinâmicas rápidas de níveis inferiores são filtradas (suavizadas) e só se manifestam como médias ou valores de equilíbrio (WU, 1999).

A teoria hierárquica sugere que para qualquer fenômeno estudado em um nível hierárquico particular, o *nível focal* (*nível 0*), o seu entendimento mecanístico vem do *nível inferior adjacente* (*nível -1*) enquanto a sua significância somente será revelada no *nível superior adjacente* (*nível + 1*) (figura 2.4). Esta estrutura tríplice é também conhecida como estrutura triádica da hierarquia, sendo que três níveis adjacentes usualmente são necessários e adequados para o entendimento da maioria dos sistemas biológicos (O'NEILL, 1988, 1989; SALTHE, 1991).

Baseada nos fundamentos da teoria hierárquica, uma nova abordagem denominada *Dinâmica Hierárquica de Manchas* emergiu no âmbito da Ecologia de Paisagem, com o intuito de tratar sistemas complexos de forma espacialmente explícita.

2.4. Dinâmica Hierárquica de Manchas (DHM)

A *Dinâmica Hierárquica de Manchas* (*DHM)*, proposta por Wu (WU, 1999; WU e DAVIS, 2002; WU e LOCKS, 1995) consiste em uma abordagem que combina os aportes de três teorias: dos sistemas complexos, da hierarquia e da dinâmica de manchas.

Considerando que a dinâmica de manchas (WATT, 1947) oferecia uma maneira poderosa para tratar a heterogeneidade espacial de modo explícito, Wu e Loucks (1995) sugeriram a integração entre a teoria da hierarquia e a dinâmica de manchas via uma nova abordagem denominada Dinâmica Hierárquica de Manchas (DHM), apresentando um arcabouço teórico para a análise da complexidade ecológica através de uma estratégia

hierárquica de passagem de escala. Com base nos conceitos de Koestler (1967) sobre taxas de fluxo em hierarquia, Wu (1999) sugere que os sistemas ecológicos seriam quase decomponíveis, em razão de seu frouxo acoplamento vertical e horizontal em estrutura e função. Na tradução da teoria hierárquica para a Ecologia de Paisagem os hólons representam sinônimos de manchas, constituindo a unidade ecológica em uma escala específica. As manchas interagem com outras no mesmo nível e em níveis superiores e inferiores de organização, através do frouxo acoplamento horizontal e vertical. Wu e Loucks (1995) e Wu (1999) sugerem que o arcabouço teórico DHM pode ser usado para perceber e modelar a paisagem como um mosaico hierárquico de manchas espacialmente aninhadas.

A lista abaixo é uma compilação da estrutura da DHM encontrada em Wu (1999):

1. Sistemas ecológicos podem ser percebidos como hierarquias de manchas espacialmente aninhadas, nas quais as manchas maiores são constituídas de manchas menores interatuantes.

2. A dinâmica de um dado sistema ecológico pode ser derivada da dinâmica de manchas interativas em níveis hierárquicos adjacentes. As manchas em níveis superiores impõem restrições descendentes aos níveis inferiores, através de processos mais lentos ou menos freqüentes. Concomitantemente, níveis inferiores fornecem condições de início, explicações mecanísticas, bem como identidade aparente aos níveis superiores, através de interações entre manchas. As distintas escalas temporais características de manchas em níveis inferiores versus superiores são a razão fundamental da quase-decomposição dos sistemas ecológicos.

3. Padrão e processo têm componentes que são reciprocamente relacionados e ambos, bem como seu relacionamento, mudam com a escala.

4. Processos estocásticos e não-equilíbrio são comuns em sistemas ecológicos. Em geral, os processos de pequena escala tendem a ser mais estocásticos e menos previsíveis. Contudo,

processos estocásticos e não-equilíbrio não trabalham necessariamente contra a estabilidade, sendo via de regra mecanismos que subjazem à aparente estabilidade de sistemas.

Para a implementação da abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas, uma estratégia denominada "escada escalar" foi proposta por Wu (1999) e Wu e Davis (2002) (ver cap. 3), que nos estudos levados a cabo nesta tese desenvolveu-se através da instrumentação de geoprocessamento em ambiente de Sistema Geográfico de Informação.

2.5. Geoprocessamento e Sistemas Geográficos de Informação

Todo o fenômeno apresenta uma localização no espaço. Partindo deste princípio e dos avanços das tecnologias de processamento e teledetecção de dados, emergem as Ciências da Geoinformação (XAVIER-DA-SILVA *et al.*, 1999). Surgem assim as expressões geoprocessamento, geotecnologias, geomática, geoinformática, sistemas geográficos de informação e geocomputação.

Na década de 1990 o uso das geotecnologias consolidou-se sob o termo Ciência da Geoinformação, que emergiu como centro de atenção por parte dos meios acadêmicos, sendo por muitos reconhecida como a nova Ciência da Terra, tal como a Ciência Cognitiva foi considerada, há duas décadas atrás, a nova Ciência da Mente (MARK, 2003). Ainda que o impacto geotecnológico tenha sido visto como ***revolução tecnológica***, cada vez mais presta-se atenção a sua capacidade para uma ***revolução científica***, principalmente apoiada pela perspectiva espacial que chega a diferentes ciências e à educação em geral (BUZAI, 2005). Segundo este autor, verifica-se que a ***inteligência espacial*** começa a ocupar um lugar de

importância junto à ***inteligência lingüística*** e à ***inteligência lógico-matemática***, que tradicionalmente têm sido privilegiadas pelo ensino.

No sentido de campo do conhecimento ou disciplina, geoprocessamento equivale ao termo Ciência da Geoinformação. Em outra acepção, o termo Geoprocessamento refere-se ao conjunto de metodologias e tecnologias envolvidas na captura, armazenamento, manipulação, recuperação, análise e apresentação de dados e de informação espacialmente referenciados (TEIXEIRA e CHRISTOFOLETTI, 1997; XAVIER-DA-SILVA *et al*., 1999) e neste sentido assemelha-se aos termos Geomática e Geoinformática.

Quando entendido como conjunto de geotecnologias, o geoprocesamento apresenta associação com quatro grupos de técnicas de manipulação de dados e informação espaciais (FATOR GIS, 2000): (a) técnicas de aquisição (Cartografia, Sensoriamento Remoto, Sistemas de Posicionamento Global - GPS, Topografia, Fotogrametria, Levantamentos de dados alfanuméricos etc.); (b) técnicas de armazenamento (Bancos de Dados – Orientado a Objetos, Relacional, Hierárquico - etc.); (c) técnicas para tratamento e análise (Modelagem de dados, Estatística, Geoestatística, Álgebra geográfica, Aritmética lógica, Funções topológicas, Redes etc.) e (d) técnicas de integração (Sistemas GIS – Geographic Information Systems, LIS – Land Information Systems, AM/FM – Automated Mapping/Facilities Management, CADD – Computer-Aided Drafting and Design).

Já os acrônimos GIS, SIG, SGI, referem-se ao Sistema Geográfico de Informação, um sistema computacional integrativo cuja utilização consiste de um conjunto de procedimentos e técnicas de captura, armazenamento, tratamento, análise e exibição de dados georreferenciados, arranjados de modo a permitir ganho de informação dirigida ao objetivo almejado. Nesta concepção está implícita a importância dos distintos componentes envolvidos na utilização de um SGI: software; hardware; dados; usuários e metodologias de análise (os dois últimos incluídos no que por vezes se denomina “peopleware”). É oportuno destacar que

os procedimentos metodológicos, o chamado “know how”, têm um papel preponderante na qualidade dos resultados da aplicação de um SGI, que por vezes pode inclusive transcender a contribuição oferecida pelo poder e sofisticação de processamento dos equipamentos e programas utilizados.

Cumpre também destacar que os SGIs podem associar instrumentação oriunda de várias abordagens, através de algoritmos internos ou pela invocação de modelos e algoritmos *ad hoc*.

Neste sentido, os SGIs podem constituir ambientes adequados para a implementação organizada de técnicas avançadas como as que estão sendo desenvolvidas em Geocomputação e Ecoinformática.

2.6. Geocomputação e Ecoinformática

De formulação mais recente que os demais acima mencionados em Ciências da Geoinformação, o termo geocomputação foi cunhado por Openshaw e Abrahart (1996) para descrever o uso da computação intensiva na descoberta de conhecimento nas áreas de geociências e geografia humana, especialmente aqueles métodos não convencionais de agrupamento e análise. Atualmente o termo inclui análise geoespacial, geovisualização e modelagem dinâmica de processos dinâmicos espaço-temporais (LONGLEY, 1998).

Geocomputação é um campo de pesquisa emergente que propõe o uso de tecnologia computacional intensiva para análise de bases de dados espaciais complexas, englobando técnicas tais como redes neurais, busca heurística e autômatos celulares (CÂMARA e MONTEIRO, 2001). Este novo conjunto de técnicas para análise espacial deriva, sobretudo, da área de inteligência artificial.

Assim como a Geocomputação, as áreas denominadas Bioinformática, Informática para Biodiversidade e Ecoinformática também surgiram recentemente devido à otimização da

capacidade computacional e do crescimento exponencial de bases de dados ambientais, que cada vez mais são disponibilizadas em formato digital através da Internet.

A Bioinformática; a Informática para Biodiversidade e a Ecoinformática representam campos interdisciplinares que focalizam o estudo da estrutura inerente à informação biológica, respectivamente com ênfase nos níveis de organização molecular; de espécie e de ecossistemas, com vistas a criar e aplicar tecnologia computacional para facilitar o acesso, a integração e a análise de bases de dados ambientais diversificadas. Dentro destas linhas, a Inteligência Artificial e o Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*) constituem uma área de rápido crescimento, que trata de identificar estrutura em dados complexos, ruidosos e muitas vezes não-lineares, com o intuito de possibilitar a geração de modelos preditivos mais acurados (RECKNAGEL, 2003; OLDEN *et al*., 2006).

2.7. Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina

A Inteligência Artificial (IA) é uma área da computação que primeiramente trabalha com o processamento simbólico de conhecimento, criando sistemas computacionais inteligentes. Na definição de Poole *et al*. (1998) IA consite no estudo e desenho de agentes inteligentes, sendo que estes são sistemas que percebem seu ambiente e realizam ações que maximizam suas chances de sucesso no desempenho de uma tarefa. Já a Inteligência Computacional (IC) (figura 2.5), por vezes empregada como sinônimo de Inteligência Artificial, procura buscar, através de técnicas inspiradas na Natureza, o desenvolvimento de sistemas inteligentes que imitem aspectos do comportamento dos seres vivos, tais como aprendizado, percepção, raciocínio, evolução e adaptação.

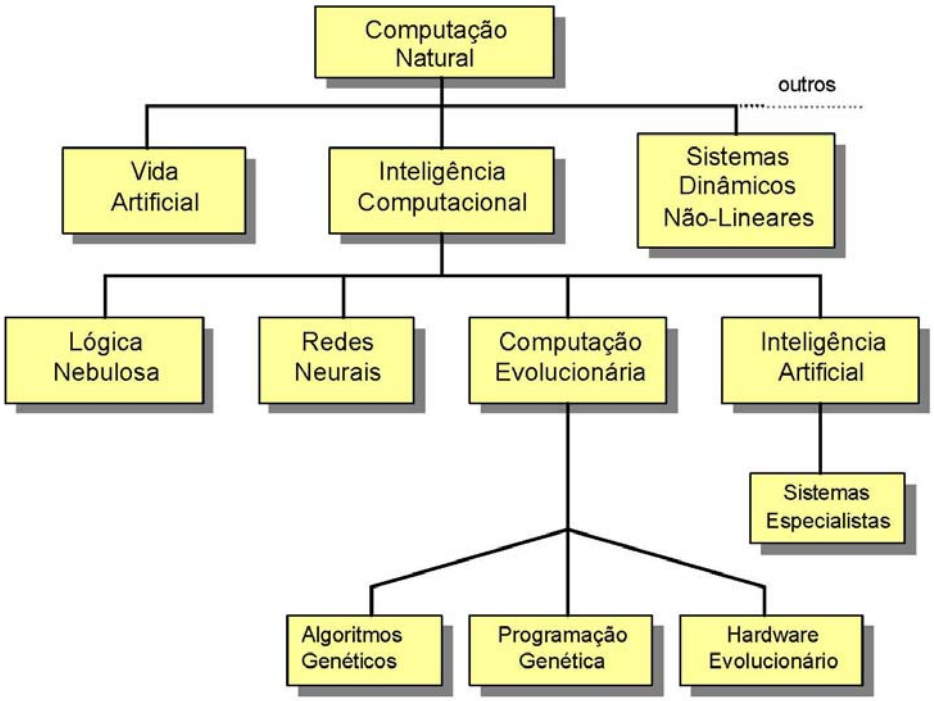


Figura 2.5. Diagrama geral da área de *Computação Natural* que incorpora, entre outras, a linha de pesquisa de Inteligência Computacional. Fonte: Modificado de ICA (2001).

Dentro da área de IA ou IC, um ramo bastante ativo é o denominado Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*), que é o estudo de algoritmos computacionais que melhoram seu desempenho de forma automática através de experiência (MITCHELL, 1997). O Aprendizado de Máquina (AM), compreende um gama de aplicações que vão desde de programas de Mineração ou Garimpagem de Dados (*Data Mining*), que descobrem regras gerais em grandes conjuntos de dados, até sistemas de filtragem de informação que automaticamente aprendem os interesses dos usuários (MITCHELL, 1997). Também conhecido como aprendizado computacional, este ramo da IA pesquisa métodos computacionais destinados à aquisição de novos conhecimentos, de novas habilidades e de novas formas de organizar o conhecimento já existente. Em termos gerais, Aprendizado de Máquina (AM) pode ser caracterizado por uma série de práticas dirigidas a solucionar problemas para os quais geralmente não se conhece *a priori* uma linha de solução ou

modelagem capaz de resolvê-los (PRATI, 2006). Nestes casos o conhecimento disponível consiste de um conjunto finito de dados que descrevem objetos, processos, situações ou ambientes e o objetivo é encontrar alguma solução a partir destes fatos. Tais procedimentos incluem, entre outros, generalização a partir de um conjunto de casos cujas classes são conhecidas (MICHIE *et al*., 1994), reconhecimento de padrões (DUDA *et al*., 2000), identificação de agrupamentos e correlações (EVERITT *et al*., 2001), refinamento de teorias a partir de métodos de aprendizado (DZEROSKI e LAVRAC, 2001) e aprendizado por realimentação dos estados do ambiente (SUTTON e BARTO, 1998).

Em aprendizado computacional existem diversos algoritmos que podem ser divididos em cinco grandes grupos de modelos: os simbólicos, os conexionistas, os estatísticos, os evolutivos e os híbridos.

Os modelos simbólicos são assim denominados por estarem baseados na manipulação de estruturas simbólicas de conceitos, englobando as técnicas que utilizam lógicas, árvores de decisão e regras de transformação.

Baseados no sistema de redes neurais biológico, os métodos conexionistas, também denominados Redes Neurais Artificiais (RNAs), são modelos matemáticos ou computacionais que consistem de um grupo de neurônios artificiais interconectados que processam informação. RNAs são sistemas paralelos distribuídos, compostos por unidades de processamento simples (neurônios) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não-lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões que estão associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede (HAYKIN, 1999). Uma RNA constitui um sistema adaptativo que muda sua estrutura de pesos das conexões interneuronais de acordo com a informação externa ou interna que flui através da rede durante a fase de aprendizagem. As

RNAs são instrumentos não-lineares para a modelagem de dados que podem ser utilizados para modelar relacionamentos complexos entre entradas e saídas ou para reconhecer padrões nos conjuntos de dados. Devido à sua estrutura, as RNAs são bastante efetivas no aprendizado de padrões a partir de dados não-lineares, incompletos, com ruídos e até compostos de exemplos contraditórios.

Já os modelos estatísticos são baseados em resultados de probabilidade, estatística e teoria da informação, possuindo sólidas bases matemáticas. Neste grupo encontram-se os algoritmos de Máxima Entropia, que surgiram no campo da mecânica estatística e empregam a abordagem estatística bayesiana para obter uma distribuição de probabilidades que se aproxime da real, com base em dados incompletos.

No grupo dos métodos evolutivos ou genéticos, os algoritmos são formalismos de classificação derivados do modelo evolutivo de aprendizagem de Holland (1975), consistindo de uma população de elementos de classificação que competem para fazer a predição. A abordagem de algoritmos evolutivos possui analogia com a genética e com a teoria evolutiva de Darwin, na qual sobrevivem os mais adaptados ao ambiente. Estes modelos são algoritmos probabilísticos que fornecem um mecanismo de busca paralela e adaptativa, baseado no princípio de sobrevivência dos mais aptos e na reprodução. O mecanismo é obtido a partir de uma população de indivíduos (soluções), representados por cromossomas (palavras binárias, vetores, matrizes etc), cada um associado a uma aptidão (avaliação da solução no problema), que são submetidos a um processo de evolução (seleção, reprodução, cruzamento e mutação) por vários ciclos. Em cada geração (iteração) os elementos que possuem um desempenho fraco são descartados, enquanto os elementos mais fortes proliferam, produzindo variações de si mesmos (PRATI, 2006).

Por último, como a própria denominação já sinaliza, os modelos híbridos são abordagens que conjugam dois ou mais dos métodos citados acima, reunidos normalmente com o intuito de suprir as deficiências de um com as qualidades de outro.

Embora o aprendizado de máquina tenha uma grande sobreposição com a estatística, uma vez que ambas as áreas estudam a análise de dados, vale ressaltar que a abordagem estatística baseia-se, sobretudo, em modelos teóricos bem definidos e no ajustamento de parâmetros a estes modelos, ao passo que o aprendizado de máquina trabalha principalmente ao nível de algoritmo, empregando representações de modelos mais flexíveis e heurísticas para a realização da busca de soluções (PRATI, 2006). Por conseqüência, a abordagem de aprendizado de máquina pode constituir instrumentação adequada para o tratamento de sistemas complexos, em função de sua flexibilidade para trabalhar com conjuntos de dados ruidosos, informação incompleta, múltiplas interações, relações não-lineares e grandes espaços de busca.

Capítulo 3

Diretrizes metodológicas gerais

Science is more than a body of knowledge; it is a way of thinking.

Carl Sagan

Logic's first rule is that reason's prerequisite is wonder. Upon this first, an in one sense this sole, rule of reason, that in order to learn you must desire to learn, and in so desiring not be satisfied with what you already incline to think, there follows one corollary which itself deserves to be inscribed upon every wall of the city of philosophy: Do not block the way of inquiry.

Charles Sanders Pierce

Um quadro geral das diretrizes metodológicas adotadas e da abrangência geográfica das pesquisas desenvolvidas nesta tese é apresentado ao longo deste capítulo. A primeira seção, de número 3.1.1, descreve a abordagem geral da pesquisa. Na segunda seção são delineadas as diretrizes metodológicas empregadas na passagem de escalas. O item 3.1.3 apresenta explanações sobre as linhas metodológicas e ambientes computacionais relacionados a geoprocessamento e Sistemas Geográficos de Informação. Na última seção, item 3.2, são caracterizados os recortes territoriais que compõem a área de estudo analisada nesta tese.

3.1. Diretrizes metodológicas gerais

3.1.1. ABORDAGEM GERAL DA PESQUISA

A abordagem geral de pesquisa desenvolvida nesta tese consistiu na implementação de um arcabouço espacializado e hierárquico para a passagem de escalas espaciais (local; paisagem; região; macrorregião/bioma), temporais (quaternário; pré-colonização européia; atual) e de organização biológica (ecossistema; espécie; população), aplicado a estudos de distribuição e persistência de elementos da biodiversidade em sistemas quaternários costeiros da Mata Atlântica.

Neste sentido, a presente tese compõe-se de três partes principais, compreendendo a grupos de estudos referentes a: (1) distribuição e status de conservação de sistemas vegetacionais quaternários costeiros; (2) gênese dos ambientes e sistemas vegetacionais associados e (3) distribuição geográfica e status de conservação de uma espécie e suas populações. Respectivamente, estes estudos correspondem aos capítulos 4, 5 e 6 desta tese.

A primeira parte desenvolve-se ao nível de organização de ecossistema, abrangendo escalas espaciais desde a local até a macrorregional de bioma, sendo que nesta última são analisados dois cortes temporais: a situação atual encontrada em 2002 e uma situação pretérita correspondente ao cenário retrospectivo pré-colonização européia. Os estudos deste grupo envolvem modelagem de distribuição baseada sobretudo em aplicações de sensoriamento remoto.

Na segunda parte, ainda em nível de ecossistema, a ênfase é dirigida a escalas temporais mais amplas, envolvendo a construção de cenários retrospectivos do Pleistoceno e Holoceno. A abordagem deste bloco baseia-se em correlações espaciais, construção de modelos conceituais de gênese dos ambientes e reconstrução paleogeográfica.

Já a última parte transita em outros níveis de organização biológica, onde a distribuição geográfica de uma espécie e suas populações é analisada ao longo das distintas escalas espaciais (local-paisagem-regional-macrorregional). Estes estudos de modelagem preditiva são desenvolvidos através de métodos conhecidos como Modelos de Distribuição de Espécies (*Species Distribution Models, SDM*) ou Modelos de Nicho Ecológico (*Ecological Niche Models, ENM*).

3.1.2. DIRETRIZES METODOLÓGICAS PARA A PASSAGEM DE ESCALA

Ao longo destes três blocos de estudos a passagem de escalas espaciais, temporais e organizacionais foi desenvolvida pela adoção do arcabouço teórico-conceitual da Dinâmica Hierárquica de Manchas, implementada através da metodologia de modelagem em múltiplas escalas, ou seja, a abordagem de "escada escalar".

Proposta por Wu (1999) e Wu e Davis (2002), a estratégia denominada "escada escalar" foi concebida para facilitar a implementação da Dinâmica Hierárquica de Manchas, sendo que sua execução compreende três etapas fundamentais: (1) identificar a hierarquia de manchas adequada; (2) fazer observações e desenvolver modelos em níveis focais e (3) extrapolar informação de forma hierárquica através dos diferentes domínios escalares (figura 3.1).

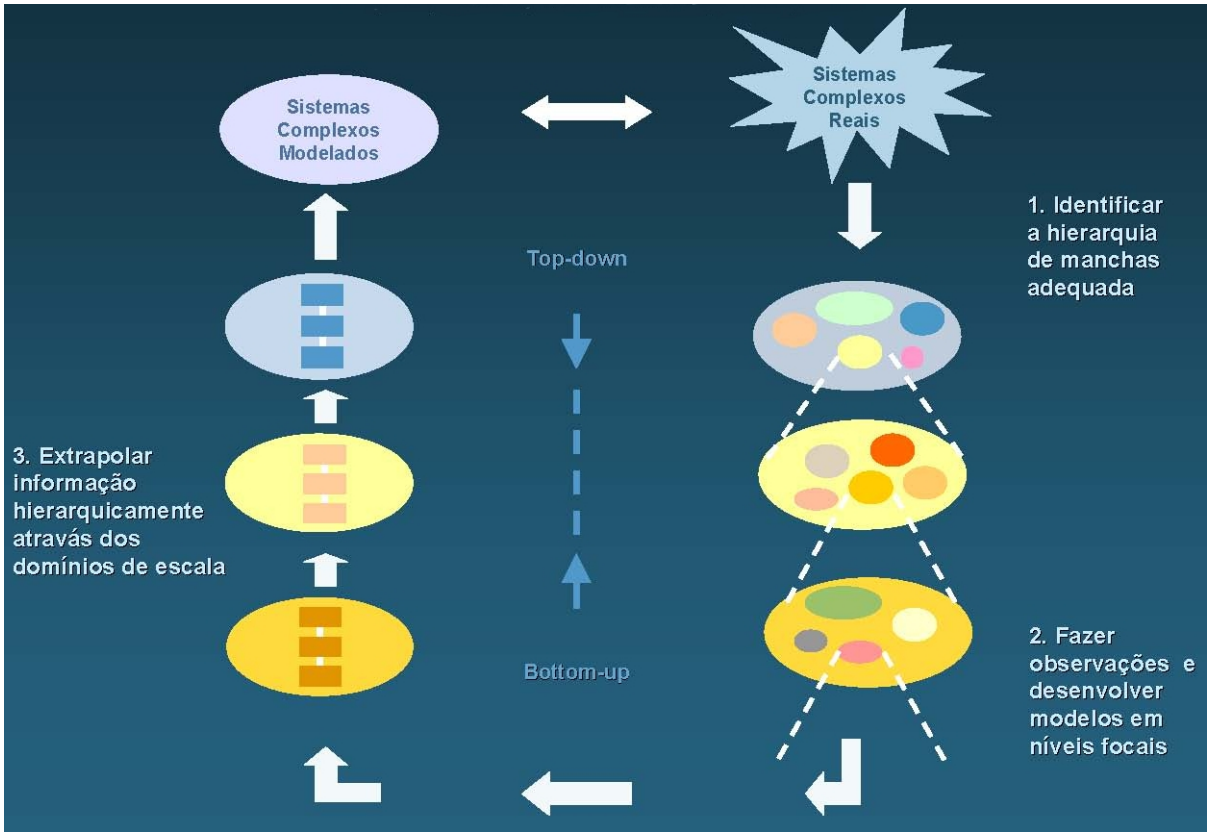


Figura 3.1. Representação esquemática das estapas de implementação da Dinâmica Hierárquica de manchas na estratégia da "escada escalar". Fonte: Adaptado de Wu (1999) e Wu e Davis (2002).

A arquitetura desenhada para a hierarquia de manchas, definidora dos níveis hierárquicos adequados para decompor a complexidade e facilitar o tratamento da questão, deve incluir um mínimo de três níveis, segundo recomendações da literatura (O'NEILL *et al*., 1986; BURNETT e BLASHKE, 2003). Os três níveis em questão correspondem ao nível focal do fenômeno em estudo (nível 0), bem como a um nível superior (nível +1) e a um nível inferior (nível -1) adjacentes. Esta arquitetura é empregada como "escada escalar" para o trânsito de dados e informação entre os domínios de escala e para o desenvolvimento e aplicação de modelos nos níveis focais. Nesta estrutura, as manchas definidas em cada nível representam os hólons, sendo que, como já dito anteriormente, os níveis superiores indicam

restrições e condições de contorno, enquanto os níveis inferiores fornecem explicações mecanísticas e condições de início.

Seguindo esta concepção, um desenho de arquitetura de níveis para a hierarquia de manchas foi elaborado para cada estudo focal, a saber: a distribuição de sistemas arbóreos em terrenos quaternários costeiros (ver capítulo 4) e a distribuição de *Leontopithecus caissara* (ver capítulo 6) no Domínio da Mata Atlântica. Em cada arquitetura desenhada estão estruturados, de modo correspondente, os níveis hierárquicos (+1, 0, -1); as entidades ao nível de organização biológica; o grão e a extensão da escala espacial; bem como a escala de gestão associada.

O desenvolvimento desta metodologia foi operacionalizado em ambiente georreferenciado, via instrumentação de geoprocessamento, utilizando Sistemas Geográficos de Informação para integrar diversas ferramentas de análise e modelagem.

3.1.3. DIRETRIZES METODOLÓGICAS DE GEOPROCESSAMENTO

As etapas de investigação envolvendo geoprocessamento baseiam-se em uma adaptação da proposta metodológica concebida pela equipe do Laboratório de Geoprocessamento (LAGEOP), do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (XAVIER-DA-SILVA, 2001). De acordo com esta metodologia, as atividades relacionadas a geoprocessamento podem ser divididas em duas etapas principais: a dos procedimentos diagnósticos e a dos procedimentos prognósticos.

3.1.3.1. Procedimentos diagnósticos

Estão compreendidos neste conjunto os procedimentos que se referem ao diagnóstico de situações existentes ou de possível ocorrência, incluindo os processamentos essenciais para

a identificação espacial e temporal de dados e questões de relevância para equacionar o fenômeno estudado. Esta etapa engloba os procedimentos de inventário (construção do banco de dados geocodificados), de cômputos e análises exploratórias (planimetrias, assinaturas ambientais e monitorias temporais) e de avaliações e modelagens.

O inventário compreende todos os aspectos envolvidos na transformação das fontes de dados em um formato digital compatível e pode ser entendido como o levantamento das características vigentes em uma determinada extensão espacial, que representa a área de estudo. Em geoprocessamento, o inventário representa a criação de um modelo digital do ambiente, onde os dados georreferenciados compõem um banco de dados geográfico (BDG), a chamada base de dados geocodificados (XAVIER-DA-SILVA, 1982).

Sobre esta base de dados é possível realizar planimetrias, que consistem na identificação e mensurações da extensão territorial de ocorrência de entidades ou eventos ambientais.

Entre as análises exploratórias, a assinatura ambiental constitui um procedimento de análise e aquisição de conhecimento empírico baseada na sobreposição de planos temáticos para extrair da base de dados as características que, causal ou aleatoriamente, são registradas em associação territorial com o fenômeno de interesse. É análoga à assinatura espectral de alvos, processo bastante conhecido e empregado em sensoriamento remoto.

Já a monitoria consiste no levantamento das alterações espaço-temporais de uma entidade ou fenômeno, obtido pela comparação entre mapeamentos de séries temporais sucessivas. Este procedimento permite acompanhar o processo de evolução, possibilitando avaliar, em certa medida, o sentido e a velocidade de progressão do fenômeno no espaço geográfico. Na monitoria, as razões entre áreas originais e áreas transformadas podem auxiliar na definição de probabilidades de transformações que sejam relevantes para o fenômeno estudado.

Conjugadas às análises exploratórias acima descritas, as avaliações e modelagens, realizadas através de vários tipos de algoritmos, compõem o quadro dos procedimentos diagnósticos, que possibilitam caracterizar, classificar e modelar o espaço em estudo.

3.1.3.2. Procedimentos prognósticos e retrospectivos

Denominam-se prognósticos e retrospectivos os conjuntos de procedimentos que possibilitam conjeturar sobre a configuração do espaço em análise em situações hipotéticas, futuras ou passadas, com base nos conhecimentos oriundos dos procedimentos diagnósticos e da introdução de elementos e interações alternativos na base de dados.

Estes cenários prospectivos baseiam-se nos modelos construídos pelos procedimentos diagnósticos da situação atual e incorporam premissas específicas para gerar um modelo que representa a situação decorrente da adoção de tais premissas. A produção de cada cenário pode compreender os efeitos de um único agente, bem como modelar diversos agentes em sinergia.

3.1.3.3. Ambientes computacionais

Os procedimentos de geoprocessamento foram efetuados em ambientes computacionais gerados principalmente pelos pacotes Idrisi-Kilimanjaro (Clark Labs/Clark University) e Vista-Saga, Sistema de Análise Geo-Ambiental (Laboratório de Geoprocessamento/UFRJ), bem como em certa parte pelos pacotes ArcView e ArcGIS (ESRI) e DIVA-GIS (HIJMANS *et al*., 2001).

As análises de estatística com dados espaciais foram auxiliadas pelo programa GeoDa (Spatial Analysis Laboratory /University of Illinois) (ANSELIN *et al*., 2006).

Os bancos de dados geográficos (BDGs) foram implementados em dois Sistemas Geográficos de Informação (SGIs): os ambientes dos pacotes Idrisi-Kilimanjaro e Vista-Saga/UFRJ.

Dentro do primeiro ambiente, diversos módulos de aplicativos foram utilizados para realizar procedimentos referentes a análises de produtos de imageamento remoto; operações vetoriais e de relacionamento com bancos de dados alfanuméricos; processamentos com operadores de padrão, textura e contexto espacial para obtenção de índices de paisagem; bem como processamentos com operadores de distância plana e esférica.

No segundo ambiente, vários módulos do pacote Vista-Saga/UFRJ (versão 2007) foram empregados para efetuar os procedimentos de planimetrias; assinaturas ambientais; monitorias; análises ambientais prospectivas; simulações e cenários retrospectivos; bem como operações de relacionamento com bancos de dados alfanuméricos.

Os SGIs foram utilizados como ambientes de integração para análises e modelagens *ad hoc*, efetuadas em algoritmos derivados de métodos da Inteligência Artificial, da Ecoinformática e da Modelagem de Nicho Ecológico (*Ecological Niche Modelling*, *ENM*).

3.2. Área de estudo

3.2.1. Recorte 1: Terrenos Quaternários no Domínio da Mata Atlântica

O primeiro recorte da área de estudo corresponde à região oriental do território brasileiro entre os estados do Rio Grande do Norte e Rio Grande do Sul, compreendendo os terrenos cenozóicos quaternários no domínio da Mata Atlântica (figura 3.2).

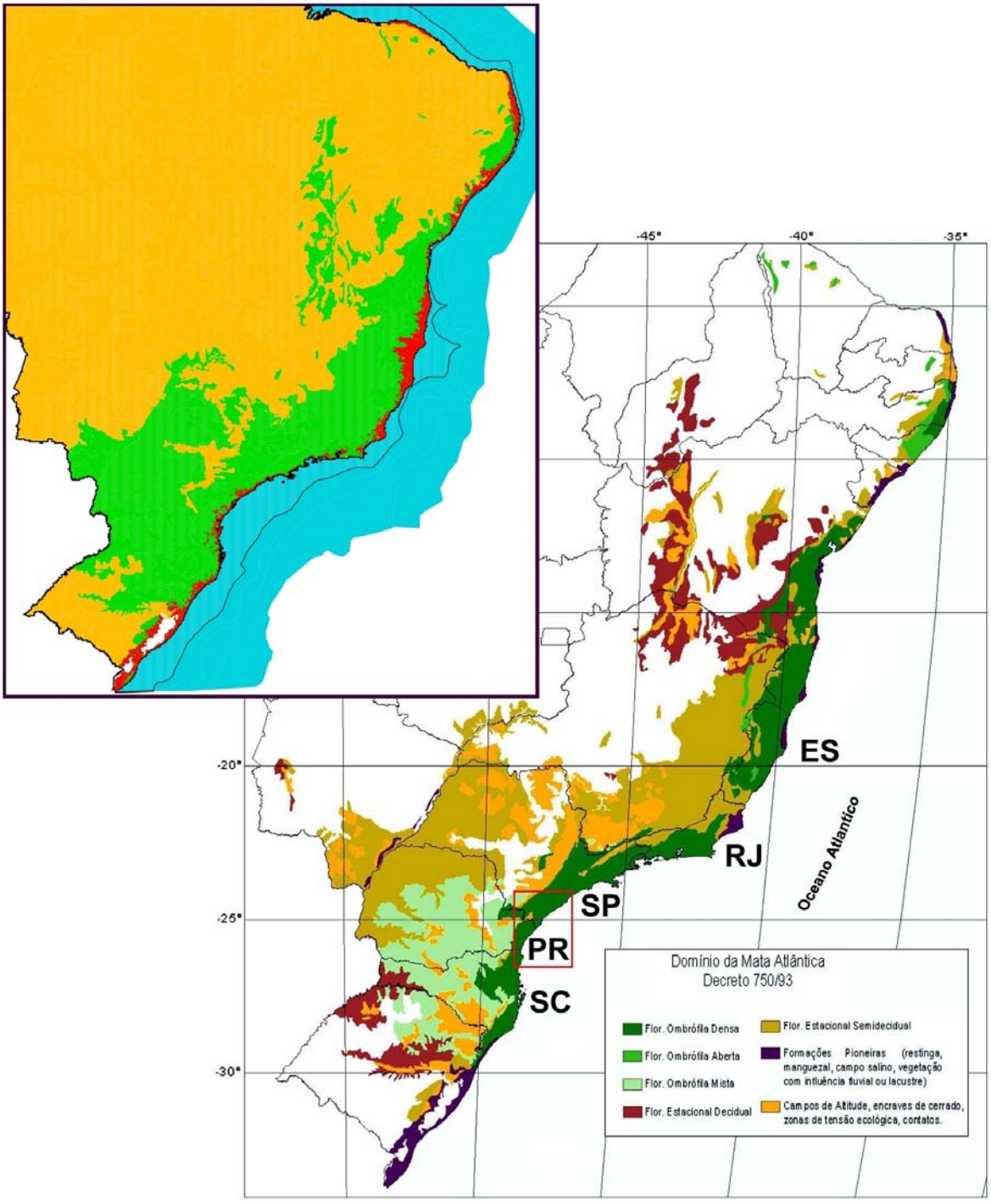


Figura 3.2. Primeiro recorte geográfico da área de estudo, em escala macrorregional, correspondendo ao Domínio da Mata Atlântica. No canto superior esquerdo, o mapa mostra em vermelho os terrenos cenozóicos costeiros dentro desta área de estudo. Fonte: CPRM. O mapa da direita mostra a distribuição de tipos vegetacionais dentro deste primeiro recorte. Fonte: SOS Mata Atlântica. O retângulo em vermelho no interior deste mapa mostra a localização do segundo recorte da área de estudo (norte de SC a sul de SP).

3.2.2. RECORTE 2: REGIÃO COSTEIRA SUL-SUDESTE

A segunda região estudada constitui um recorte situado entre as coordenadas 24°15’S, 46°30’W e 26°15’S , 49°00’W, na região litorânea do sul do estado de São Paulo, do Paraná e do norte de Santa Catarina (figura 3.3).

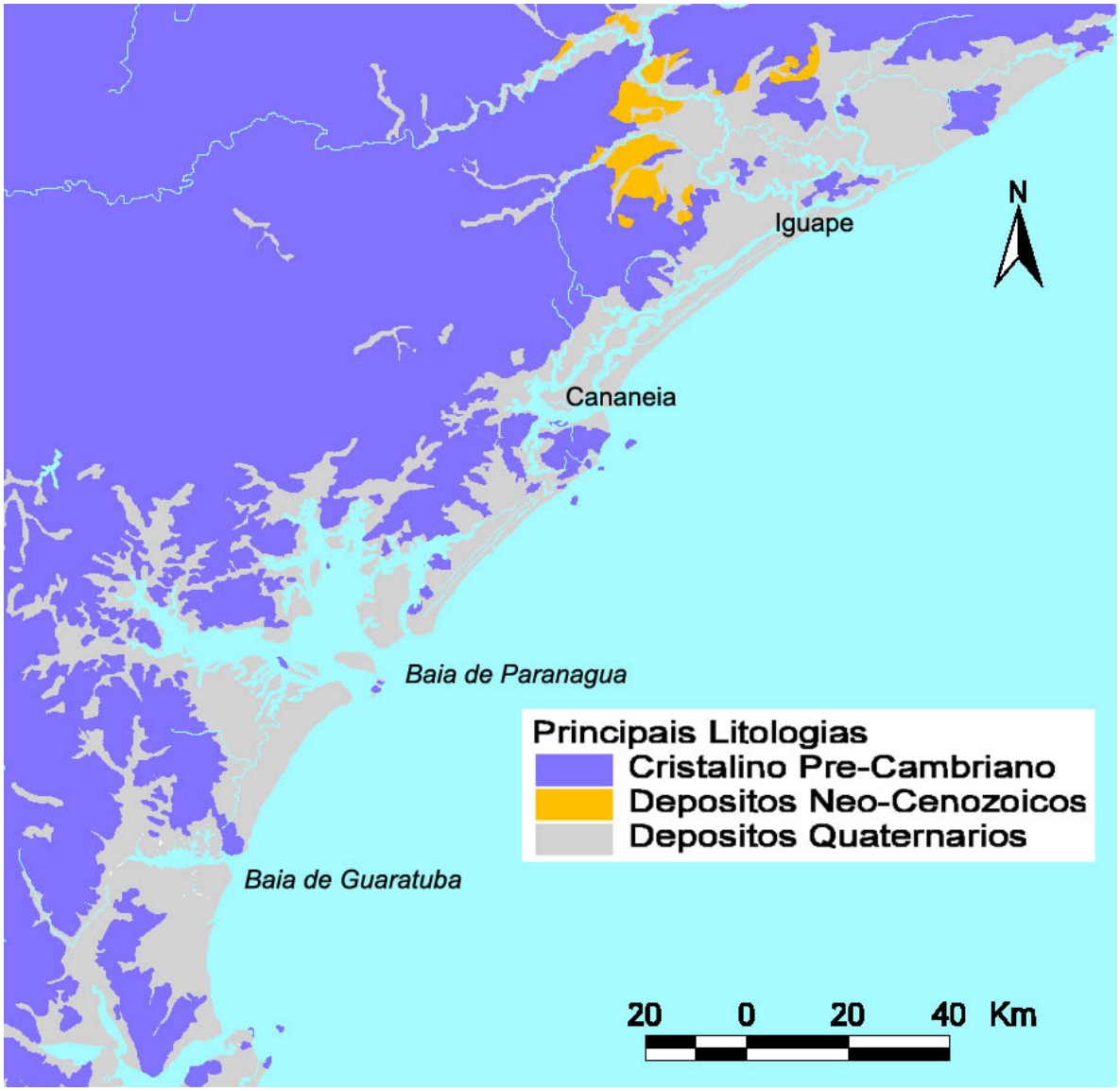


Figura 3.3. Segundo recorte geográfico da área de estudo, em escala regional, correspondendo ao setor litorâneo entre o sul de São Paulo e o norte de Santa Catarina. O mapa mostra a distribuição das principais litologias nas planícies e terraços quaternários dentro desta área de estudo. Fonte: CPRM.

Em termos de seu relevo, a área de estudo compreende duas regiões distintas, a das serras e a das planícies, sendo que esta última engloba as planícies propriamente ditas e as baías ou corpos d'água estuarinos. A região das serras constitui uma zona de relevo íngreme, que pode ultrapassar 1000 m acima do nível do mar, como na Serra do Gigante, localizada na região limítrofe dos estados do Paraná e São Paulo. Os setores serranos com rochas mais resistentes ao intemperismo, como os granitos e quartzitos, sustentam um relevo com declividades mais fortes, sendo comum a ocorrência de paredes verticais ou quase verticais com afloramentos de rocha. Nos locais onde ocorrem rochas mais friáveis como migmatitos, gnaisses e xistos, as declividades são menores e as cristas do relevo mais arredondadas (ANGULO, 1992).

De um ponto de vista geomórfico, cabe ressaltar a outra grande feição da região de estudo, representada pela planície litorânea, que compreende extensas áreas de relevo plano e suave ondulado, cuja gênese resulta de depósitos de origem continental e marinha, em sua maior parte de idade quaternária pleistocênica e holocênica. Estes terrenos quaternários são recobertos sobretudo por Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas e Formações Pioneiras de Influência Marinha (formações de restingas), entrecortados por Formações Pioneiras de Influência Fluviomarinha (manguezais) e de Influência Fluvial (formações de várzea).

Grosso modo, as altitudes na planície aumentam da costa para o continente, alcançando os maiores valores no sopé da serra. O relevo plano da planície, que possui em geral altitudes inferiores a 15 m sobre o nível do mar, é interrompido em alguns locais pela presença de colinas e morros isolados, que podem atingir altitudes de centenas de metros (ANGULO, 1992).

De um ponto de vista clássico e em concordância com a classificação universal de Köeppen, esta segunda área focal apresenta dois tipos climáticos: *Cfa* e *Cfb*. Abrangendo a parte norte da área, o tipo *Cfa*, *clima temperado úmido com verão quente*, apresenta

temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, porém superior a -3°C, enquanto a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C. Está sujeito a geadas pouco freqüentes, a precipitações regulares todos os meses e não apresenta estação seca definida. Já na porção sul, o tipo *Cfb*, *clima temperado úmido com verão fresco*, embora também possua a temperatura média do mês mais frio entre 18°C e -3°C, apresenta a temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C. Também não apresenta estação seca, estando sujeito a precipitações regulares todos os meses e a geadas severas (IPARDES, 1995).

A área faz parte da maior porção contínua preservada da Mata Atlântica, abrigando os diversos ecossistemas e a biodiversidade deste bioma, tanto em termos bióticos como culturais. Em sua totalidade constitui área de algum modo protegida, incluindo diversas unidades de conservação estaduais e federais, tais como: Área de Proteção Ambiental de Guaratuba; Área de Proteção Ambiental de Guaraqueçaba; Estação Ecológica de Guaraqueçaba; Parque Nacional de Superagüi; Parque Estadual de Jacupiranga; Parque Estadual da Ilha do Cardoso e Área de Proteção Ambiental de Cananéia-Iguape-Peruíbe.

Reconhecendo a grande importância desta porção litorânea para a preservação e compreensão da vida no planeta, em 1991 a UNESCO concedeu à área o título de Reserva da Biosfera, com a criação da Reserva da Biosfera Vale do Ribeira e Serra da Graciosa.

As porções paranaense e paulista desta região estão também incluídas no Corredor de Biodiversidade da Serra do Mar.

Capítulo 4

Nível de ecossistemas: distribuição geográfica e status de conservação

"*A map is not the territory it represents, but if correct,*
it has a similar structure to the territory,
which accounts for its usefulness"
Alford Korzybski

"Maps stimulate desires – for territory, for natural resources,
for real estate development, even for conservation…
If developers are the only people mapping the land's future use,
then they control the land use agenda… If maps are the agenda,
then conservationists must enter the mapping arena".
Michael Soulé & John Terbogh

Este capítulo apresenta o primeiro estudo de caso desenvolvido nesta tese, que abrange análises de distribuição geográfica e status de conservação em nível de organização biológica de ecossistemas. O estudo aborda os sistemas arbóreos quaternários costeiros da Floresta Atlântica em múltiplas escalas espacias, desde a escala local, de paisagem, de região (sistemas vegetacionais do litoral norte de SC, PR e sul de SP) até a de bioma (sistemas arbóreos quaternários no domínio da Mata Atlântica). Na escala macrorregional de bioma as análises envolvem duas escalas temporais, um cenário retrospectivo pré-colonização européia e a situação atual em 2001. A seção introdutória 4.1 versa sobre a importância do tema cobertura do solo, o uso do sensoriamento remoto, os problemas da classificação de imagens e os métodos de inteligência artificial. Nas secções seguintes são apresentados a abordagem, os objetivos e as hipóteses da pesquisa. Em 4.5 são descritas as fontes e métodos empregados, bem como os resultados iniciais referentes à criação de metodologias e formação da base de dados. Na seção 4.6 são apresentados os resultados principais e discussões a eles pertinentes. Finalmente, no item 4.7 são elencadas as conclusões da pesquisa.

4.1. Considerações inicias

Não há dúvidas de que padrões significantes de diversidade biológica e os processos que os modelam ocorrem em múltiplas escalas espaciais e temporais. Na dimensão espacial estes padrões e processos englobam escalas geográficas desde a extensão local, regional, continental até a global. Em termos da dimensão temporal, as várias escalas incluem desde aquelas dos processos ecológicos de curto prazo até as relacionadas aos processos evolutivos de muito longo prazo. A própria biodiversidade representa um conceito multiescala, já que abrange vários níveis de organização desde a diversidade genética dentro de populações locais até a diversidade de ecossistemas através das paisagens.

Este capítulo apresenta um estudo da distribuição dos sistemas arbóreos do quaternário costeiro do Domínio da Mata Atlântica, adotando uma abordagem que explora múltiplas escalas espaciais, em dimensão temporal histórica e atual e em nível de organização de ecossistema. Um arcabouço espacialmente explícito, baseado na Dinâmica Hierárquica de Manchas e construído em ambiente de Sistema Geográfico de Informação, é utilizado para analisar a temática da cobertura do solo através de procedimentos de sensoriamento remoto, geoprocessamento e ecoinformática.

4.1.1. A IMPORTÂNCIA DO TEMA COBERTURA DO SOLO

A distribuição geográfica da vegetação constitui uma característica essencial da biosfera, influenciando a troca de matéria e energia com a atmosfera, a biodiversidade e muitos outros parâmetros ecológicos (HILBERT e OSTENDORF, 2001). Nas áreas naturais a vegetação, ou a sua ausência, representa o fator fundamental que define não somente os tipos

de cobertura como também as outras características dos ecossistemas que constitui (CASTILLA, 2003).

De um modo geral, os esforços de mapear esta distribuição dos sistemas vegetacionais via de regra derivam ou coincidem com as atividades de mapeamento de *cobertura do solo*.

Ao lado do clima, o *uso do solo*, que se manifesta em mudança de cobertura do solo, também constitui fator primordial no controle da estrutura, função e dinâmica de sistemas terrestres e aquáticos do planeta, desde escalas locais até continentais. Devido à existência de interações complexas e de retroalimentações entre as manifestações antrópicas diretas e as suas diversas conseqüências ecológicas, a mudança de cobertura do solo configura-se como um fenômeno de modificação ambiental integrado. Este fenômeno de mudança ambiental varia em escalas locais, regionais e continentais, sobretudo em função da conectividade de sistemas físicos, biológicos e sociais.

De fato, ao longo da história da humanidade, a *terra* (o *solo*), no sentido de substrato de recursos, tem representado um signo de grande importância na estruturação espacial das sociedades. Segundo Hoover e Giarratani (1984) (*apud* ALMEIDA *et al*., 2005), o signo *terra (solo)* inicialmente denota espaço; em seguida remete a atributos como propriedades topográficas, estruturais, agrícolas e minerais do lugar; o clima; a disponibilidade de ar e água; evocando por fim uma gama de características ambientais subliminares tais como tranqüilidade, privacidade, aparência estética, entre outras.

A *cobertura* e o *uso do solo* representam os elementos integradores da base de recursos representada pelo signo *terra (solo)*, sendo que mudanças ocorrentes nestes dois elementos podem afetar os outros sistemas globais (*e.g.* atmosfera, clima e nível do mar). Do mesmo modo, ainda que estas mudanças possam ocorrer de forma localizada, quando consideradas em conjunto podem envolver uma quantidade de lugares que seja suficiente para produzir efeitos significativos (MEYER e TURNER, 1992). O primeiro elemento, a *cobertura*

do solo, constitui a expressão das atividades humanas sobre a superfície da Terra e, por conseguinte, sofre mudanças em paralelo às alterações ocorridas nos vetores que dirigem as ações antrópicas. Assim sendo, a cobertura do solo representa uma feição geográfica que constitui base de referência para um amplo espectro de aplicações, entre as quais estão incluídos desde o monitoramento de sistemas naturais e seminaturais até a produção de estatísticas e de planejamento para a tomada de decisões de investimento, de conservação da biodiversidade, de recuperação de áreas degradadas, de ações frente às mudanças globais e de controle de desertificação, entre muitos outros (DI GREGORIO, 2005).

Embora as atividades antrópicas tenham continuamente remodelado o planeta, não há precedentes para a magnitude e a taxa das modificações registradas no presente (VITOUSEK *et al*. 1997; ROJSTACZER *et al*. 2001; IPPC, 2001; ROOT *et al*., 2003; MEA, 2005). Em conseqüência, a demanda de informação geográfica tem crescido substancialmente nas últimas décadas, sendo que, como bem sublinhado por Castilla (2003), esta demanda cresce a um ritmo talvez superior apenas ao desenvolvimento de metodologias e tecnologias que a tornem acessível. É oportuno o destaque de que com base nesta informação geográfica as autoridades tomam decisões, bem como também através dela o público forma opinião, o que por sua vez influencia os tomadores de decisão. Portanto, a qualidade da informação, em termos de extensão, detalhe e atualidade, constitui um requisito indispensável para uma sociedade próspera e preocupada com seu meio ambiente. Dentre os temas que compõem a informação geográfica, um dos mais imporantes é a distribuição espacial dos distintos tipos de cobertura do solo existentes, tendo em vista que é em função de sua natureza e estado que se ordenam as ações e normativas em cada zona concreta do território (CASTILLA, 2003).

Atualmente também já não há dúvidas de que o conhecimento sobre a evolução dos padrões de cobertura do solo ao longo do tempo é de crucial importância, tanto para avaliar estas mudanças que vem remodelando o planeta, quanto para melhorar a capacidade de

previsão das tendências futuras e dos impactos que estas transformações representariam para a vida das pessoas. Deste modo, dados que forneçam informação descritora da cobertura do solo atual constituem uma entrada importante para atividades de planejamento e de modelagem de cenários e simulações, sendo que a qualidade de tais dados define a confiabilidade dos resultados simulados (TOWNSHEND, 1992; BELWARD, 1996).

Uma grande demanda por bons conjuntos de dados de cobertura do solo vem sendo imposta pela crescente necessidade de descrever e classificar este tema de forma precisa, com vistas a possibilitar o desenvolvimento de sistemas sustentáveis de uso do solo. Em paralelo aumenta também a necessidade de padronização e compatibilidade entre os conjuntos de dados, para que seja possível mapear, avaliar e monitorar áreas extensas de maneira consistente (DI GREGORIO, 1991; THOMPSON, 1996; FAO, 1995).

4.1.2. SENSORIAMENTO REMOTO E MAPEAMENTO MACRORREGIONAL DE COBERTURA DO SOLO

Os avanços tecnológicos representados pela vasta quantidade de dados de sensoriamento remoto, que se tornou disponível a partir da obtenção de imagens por satélite, aliada à aumentada capacidade de processamento dos atuais sistemas computacionais, tem paulatinamente aumentado a possibilidade de atender às demandas acima relacionadas (DI GREGORIO, 1995).

O sensoriamento remoto representa uma ferramenta indispensável para a realização de monitoramento de formas mais extremas de mudança de cobertura do solo, a um custo relativamente baixo, quando a área em foco apresenta grande extensão geográfica (NEPSTAD *et al*., 1999). Na última década, os avanços alcançados na caracterização de cobertura do solo a partir de dados de satélite têm contribuído de maneira substancial para o entendimento da distribuição global dos tipos de vegetação e de uso do solo (DE FRIES e TOWNSHEND, 1994; FRIEDL *et al*., 2002a; HANSEN *et al*., 2000b; LOVELAND *et al*., 2000; WESSELS *et*

al., 2004). Contudo, os planos de conservação são mais adequadamente desenvolvidos quando realizados em escala regional e macrorregional, de modo que possam ser considerados os processos espaciais e as variadas condições biofísicas e socioeconômicas.

De forma geral, os dados de satélite até recentemente ofereciam apenas duas opções para análises em escala macrorregional, cobrindo extensões da ordem de milhares de quilômetros. Uma opção consistia em utilizar subconjuntos de dados de resolução grosseira, adquiridos em cobertura global a partir de sensores tais como o AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) e o SPOT Vegetation (*e.g*. MALINGREAU *et al*., 1995; MAYAUX *et al*., 1998; HANSEN *et al.*, 2000b; WESSELS *et al*., 2004). A alternativa referia-se ao uso de mosaicos de dados de alta resolução, oriundos de sensores como o Landsat e o SPOT HRV (*e.g.* CHOMENTOWSKI *et al*., 1994; INPE, 2000; SKOLE e TUCKER, 1993; TUCKER e TOWNSHEND, 2000; WESSELS *et al*., 2004). A primeira opção tem a vantagem da alta resolução temporal da obtenção de imagens diárias, mas apresenta a grande desvantagem da fraca resolução espacial máxima de 1km. Já a segunda abordagem apresenta alta resolução espacial de 15-30m, porém a resolução temporal do imageamento conta com passagens bem menos freqüentes. As limitações de aquisição do sensor do Landsat, embora otimizadas pelo lançamento do Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) em 1999, impõem restrições para as análises de cobertura do solo acima referidas, em função das dificuldades relativas aos ruídos produzidos por condições atmosféricas de nebulosidade, problemas de calibração em cenas distintas, além do intensivo requerimento em horas de trabalho para lidar com mosaicos de muitas cenas (GOWARD e WILLIAMS, 1997; TUCKER e TOWNSHEND, 2000; WESSELS *et al*., 2004).

Uma nova opção passou a ser disponível através dos dados oriundos do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), adquiridos diariamente em resolução espacial de 250m a 1km, que oferecem uma possibilidade de cobertura temporal

freqüente em resoluções espaciais moderadas. Vários produtos de abrangência global estão sendo derivados de dados deste sensor, tais como cobertura do solo, produtividade primária líquida e índice de área foliar, porém a sua aplicabilidade em escala regional ainda necessita ser explorada (JUSTICE *et al*., 2002). A imagem MODIS de cobertura do solo com *pixel* de 1km é um dos componentes de uma série de produtos globais disponíveis, sendo que em sua geração são utilizadas várias entradas de dados derivados do sensor MODIS, tais como reflectância da superfície, índice de vegetação, temperatura e textura da superfície, resultando em um produto global que segue o sistema de classificação do IGBP (International Geosphere–Biosphere Programme) (FRIEDL *et al*., 2002b). Embora este produto global MODIS de cobertura do solo seja de utilidade para aplicações em escala planetária e continental, existem matrizes de dados de reflectância com *pixel* de menor tamanho, também oriundas deste sensor, que podem ser usadas para mapear cobertura do solo em escala regional, de acordo com esquemas de classificação que atendam as necessidades específicas dos usuários (WESSELS *et al*., 2004). Este instrumento do sensor MODIS foi projetado para produzir dados em resolução espacial de 250 a 500m, tendo em vista que análises empíricas já demonstraram que resoluções mais finas do que a de 1km são de grande valia para o mapeamento de cobertura do solo e de impacto antrópico (TOWNSHEND e JUSTICE, 1988; JUSTICE *et al*., 2002; TOWNSHEND e JUSTICE, 2002).

4.1.3. PROBLEMAS NA CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS E MÉTODOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Embora dados de sensoriamento remoto sejam amplamente utilizados para mapeamento de cobertura do solo e vegetação, tais atividades enfrentam o problema de que as classes de interesse muitas vezes não são perfeitamente separáveis no espaço de características provido pelos dados espectrais. Neste sentido, avanços recentes na classificação de imagem têm demostrado que técnicas de classificação convencionais “duras”

("*hard"*), que alocam cada *pixel* a uma classe específica, são muitas vezes impróprias para aplicações onde a imagem apresenta *pixels* mistos em abundância (FOODY, 1996). Em uma imagem de sensoriamento remoto pode haver, por exemplo, uma transição contínua e gradual entre as classes de cobertura, resultando em regiões compostas por *pixels* mistos. Adicionalmente, devido à resolução limitada da imagem, muitas vezes os *pixels* representam áreas do terreno que compreendem duas ou mais classes de cobertura do solo discretas. Assim sendo, tem sido proposto que procedimentos de lógica nebulosa (*"fuzzy"*) devam ser acomodados no processo de classificação para que os *pixels* possam apresentar pertinência múltipla ou parcial às classes de cobertura (FOODY, 1996; 1997). Neste caso, uma medida da força de pertinência para cada classe é computada pelo classificador, resultando em uma técnica de classificação "suave" (*"soft"*).

No campo do mapeamento preditivo a acurácia geral dos mapas de cobertura florestal é geralmente decepcionante, sobretudo quando os tipos florestais são discriminados em nível mais detalhado (SKIDMORE e TORNEIRO, 1988). Este fato deve-se principalmente às limitações inerentes envolvidas em separar um *continuum* complexo de características florestais em classes discretas, o que conduz inevitavelmente à geração de erros de omissão e comissão, resultando em menor acurácia preditiva (LEES, 1996).

Recentemente métodos oriundos da Inteligência Artificial e modelos não-paramétricos têm sido empregados na classificação de cobertura do solo, sendo que os resultados obtidos indicam uma melhor performance destas abordagens em comparação aos métodos paramétricos tradicionais. Entre estes métodos não-paramétricos os mais eminentes são as Redes Neurais Artificiais (RNAs), as Árvores de Decisão, os classificadores baseados na Teoria de Evidência de Dempster-Shafer, os Sistemas Especialistas e as Máquinas de Suporte de Vetor (LEE *et al*, 1987; HEPNER, 1990; BENEDIKTSSON *et al*, 1990; 1995; PAOLA e SCHOWENGERDT, 1995; LEES e RITMAN, 1991; MOORE *et al*,1991; SKIDMORE e

TURNER; 1988; PAL e MATHER, 2005). Os métodos do domínio da IA e do Aprendizado de Máquina, por serem mais flexíveis, baseados em algoritmos e heurísticas, podem apresentar uma alternativa interessante para trabalhar com cenas e imagens complexas. No mesmo sentido, os modelos não-paramétricos têm vantagens óbvias sobre os modelos paramétricos quando o mapeamento florestal preditivo baseia-se em múltiplas fontes, haja vista que uma das principais desvantagens dos modelos paramétricos consiste na assunção de determinada distribuição estatística para o conjunto de dados, que geralmente não é compatível com dados de múltiplas origens. Ao contrário, os modelos não-paramétricos não se baseiam em um modelo de distribuição *a priori*, ou seja, não fazem nenhuma suposição sobre a distribuição dos dados.

No contexto dos classificadores não-paramétricos e/ou de Aprendizado de Máquina dirigidos a imagens de sensoriamento remoto de múltiplas fontes, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) figuram entre os métodos mais promissores (BENEDIKTSSON *et al*., 1990; 1995; HEPNER , 1990). As RNAs exibem propriedades interessantes tais como a capacidade de aprender em conjuntos de dados complexos e ruidosos; de formar limites de decisão altamente não-lineares no espaço de características; de lidar com colinearidade e ausência de normalidade em um sistema (HAYKIN, 1994; ATKINSON e TATNALL, 1997).

4.2. Abordagens e motivação da pesquisa

No presente estudo procurou-se desenvolver uma abordagem baseada em sensoriamento remoto em múltipla resolução, com vistas a analisar a cobertura do solo em terrenos quaternários costeiros da Mata Atlântica, bem como a investigar a eficácia da combinação de duas estratégias: a utilização de mosaicos de detalhe baseados em cenas Landsat-7/ETM+ com resolução espacial de 30m e o emprego de produtos MODIS com

resolução melhorada de 500m. Para a análise destes produtos de imagens, após a avaliação de performance em comparação com classificadores tradicionais paramétricos, foram utilizados modelos baseados em RNAs.

Através desta abordagem multiescala busca-se construir um arcabouço que permita transitar entre janelas amplas de visão sinóptica e janelas menores de visão detalhada. Pretende-se assim fornecer um quadro diagnóstico da distribuição geográfica do sistema de coberturas arbóreas quaternárias do litoral da Mata Atlântica em escala macrorregional de bioma, bem como em uma janela de observação na escala regional, que destaca o litoral norte de SC até o sul de SP, onde procura-se levantar a diversidade de coberturas arbóreas deste sistema.

A motivação deste estudo tem origem na dificuldade de avaliar a situação dos sistemas arbóreos quaternários costeiros com base nos mapeamentos existentes para o bioma Mata Atlântica (*e.g.* SOS MATA ATLÂNTICA, 1998; 2002). Embora estes mapeamentos sejam de grande utilidade e estejam baseados em produtos de imageamento remoto de detalhe, sobretudo em imagens Landsat, ocorre que, em virtude da taxonomia da classificação utilizada, na legenda destes mapeamentos os referidos sistemas vegetacionais encontram-se embutidos ora na categoria das Áreas de Formações Pioneiras, ora naquela da Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas. No primeiro caso, os sistemas arbóreos perdem sua identidade pela agregação com as coberturas herbáceas e arbustivas que são as mais características da categoria das Áreas de Formações Pioneiras. Por outro lado, quando englobados na categoria da Floresta Ombrófila Densa, o significado destes sistemas vegetacionais é diluído pela preponderância de sistemas florestais mais desenvolvidos, característicos de substratos terciários, tais como as Florestas de Tabuleiros sobre a Formação Barreiras. Em um breve parêntese, cabe destacar que embora ambas façam parte da classe Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, as formações florestais que se desenvolvem sobre

tabuleiros terciários e aquelas que ocorrem sobre terrenos quaternários constituem ecossistemas totalmente distintos, diferindo marcadamente em estrutura e composição. Voltando à questão dos mapeamentos existentes para a Mata Atlântica, em alguns dos produtos citados ocorre inclusive que sistemas arbóreos quaternários costeiros estejam mapeados alternadamente nas duas categorias, tanto em Áreas de Formações Pioneiras como em Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas. Nesta situação, no caso dos mapeamentos da SOS Mata Atlântica, ainda que no texto que descreve a metodologia da classificação os referidos sistemas vegetacionais estejam incuídos na categoria Restinga, nos produtos cartográficos os mesmos encontram-se rotulados como Restinga em algumas regiões, como por exemplo nos estados da região Sul, enquanto que em outras estão mapeados como Mata, como por exemplo, nos estados do Espírito Santo e Bahia. Em conseqüência, as incertezas derivadas de problemas de mapeamento como os acima descritos criam grandes dificuldades para avaliar a situação geral dos ecossistemas arbóreos quaternários do Brasil oriental.

Partindo deste contexto, o presente estudo foi conduzido no sentido de desenvolver um arcabouço integrado, hierárquico e multiescalar que permitisse transitar desde a escala local até a macrorregional de bioma, possibilitando assim as análises da distribuição geográfica e do status de conservação do sistema de coberturas arbóreas quaternárias costeiras da Mata Atlântica.

4.3. Objetivos da pesquisa

- Avaliar a adequabilidade de um sistema de classificação de cobertura do solo global (o "Land Cover Classification System - LCCS" / FAO-UNEP) na definição da legenda do mapeamento de sistemas quaternários do Brasil oriental, bem relacionar as classes

resultantes a um sistema nacional de classificação de vegetação (o "Sistema Fitogeográfico" / IBGE).

- Construir uma base de dados geocodificados que permita mapear os sistemas arbóreos quaternários costeiros e posteriormente estabelecer relações entre a sua ocorrência e a de variáveis ambientais.

- Avaliar a aplicabilidade de estratégias multi-resolução e multi-sensor com produtos Landsat-7/ETM+ e MODIS para geração de mapeamentos regionais e macrorregionais a partir de sensoriamento remoto.

- Testar algoritmos não-lineares de aprendizagem de máquina por Redes Neurais Artificiais para a classsificação digital de imagens de sensoriamento remoto na temática de cobertura do solo.

- Mapear a distribuição dos sistemas alvo em um arcabouço que possibilite a passagem pelas escalas local, de paisagem, de região (norte de SC, PR e sul de SP) e de bioma ou global (domínio da Mata Atlântica).

- Caracterizar a distribuição geográfica das formações arbóreas do quaternário costeiro da Mata Atlântica nos recortes territoriais analisados.

- Comparar a distribuição geográfica atual destes sistemas arbóreos quaternários costeiros com a situação na época pré-colonização européia.

- Analisar a representatividade dos sistemas arbóreos do quaternário costeiro da Mata Atlântica dentro do sistema de unidades de conservação federais.

4.4. Hipóteses da pesquisa

Hipótese 1: *Sobre a adequação de sistemas de classificação de cobertura do solo*

1 - H_0: Um sistema de classificação de cobertura do solo global (o "Land Cover Classification System - LCCS" / FAO-UNEP) não permite definir uma legenda adequada para o mapeamento regional de sistemas quaternários do Brasil oriental.

1 - H_1: Um sistema de classificação de cobertura do solo global (o "Land Cover Classification System - LCCS" / FAO-UNEP) permite definir uma legenda adequada para o mapeamento regional de sistemas quaternários do Brasil oriental.

Hipótese 2: *Sobre o desempenho de algoritmos classificadores não-lineares de aprendizagem de máquina*

2 - H_0: Classificações baseadas em algoritmos não-lineares de aprendizagem de máquina por Redes Neurais Artificiais não apresentam melhor performance do que as produzidas por classificadores tradicionais paramétricos como LDA de Fisher (análise Linear Discriminante) e Maxlike (Máxima Verossimilhança).

2 - H_1: Classificações baseadas em algoritmos não-lineares de aprendizagem de máquina por Redes Neurais Artificiais apresentam melhor performance do que as produzidas por classificadores tradicionais paramétricos como LDA de Fisher (análise Linear Discriminante) e Maxlike (Máxima Verossimilhança).

Hipótese 3: *Sobre a efetividade da estratégia de mapeamento multi-resolução e multi-sensor*

3 - H_0: A estratégia multi-resolução e multi-sensor com produtos Landsat-7/ETM+ e MODIS não possibilita integrar janelas de maior detalhe e janelas sinópticas na geração de mapeamentos regionais e macrorregionais.

3 - H_1: A estratégia multi-resolução e multi-sensor com produtos Landsat-7/ETM+ e MODIS possibilita integrar janelas de maior detalhe e janelas sinópticas na geração de mapeamentos regionais e macrorregionais.

Hipótese 4: *Sobre o padrão de distribuição geográfica dos sistemas arbóreos quaternários costeiros do Brasil oriental*

4 - H_0: A distribuição geográfica dos sistemas arbóreos quaternários costeiros do Brasil oriental apresenta um caráter uniforme ou aleatório ao longo de escalas espaço-temporais e de organização biológica.

4 - H_1: A distribuição geográfica dos sistemas arbóreos quaternários costeiros do Brasil oriental apresenta-se organizada em agregados ao longo de escalas espaço-temporais e de organização biológica.

Hipótese 5: *Sobre a redução e fragmentação dos sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica*

5 - H_0: A distribuição geográfica atual dos sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica não se encontra reduzida e fragmentada, refletindo o impacto da ocupação antrópica na faixa litorânea brasileira.

5 - H_1: A distribuição geográfica atual dos sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica encontra-se reduzida e fragmentada pelo impacto da ocupação antrópica na faixa litorânea brasileira.

Hipótese 6: *Sobre a representatividade dos sistemas arbóreos do quaternário costeiro da Mata Atlântica na rede de unidades de conservação federais*

6 - H_0: Os sistemas arbóreos do quaternário costeiro da Mata Atlântica estão bem representados dentro do sistema de unidades de conservação federais.

6 - H_1: Os sistemas arbóreos do quaternário costeiro da Mata Atlântica estão insuficientemente representados dentro do sistema de unidades de conservação federais.

Hipótese 7: *Sobre a eficácia da abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação*

7 - H_0: A abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação não permite transitar nas escalas local, de paisagem, de região (norte de SC, PR e sul de SP) e de bioma ou global (domínio da Mata Atlântica) em análises de sistemas arbóreos quaternários costeiros.

7 - H_1: A abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação permite transitar nas escalas local, de paisagem, de região (norte de SC, PR e sul de SP) e de bioma ou global (domínio da Mata Atlântica) em análises de sistemas arbóreos quaternários costeiros.

4.5. Materiais e métodos

4.5.1. INVENTÁRIO DE FONTES BIBLIOGRÁFICAS E CARTOGRÁFICAS

Esta primeira etapa teve um papel crucial na definição do escopo e do encadeamento das atividades deste trabalho. Efetuou-se um levantamento bibliográfico focalizado sobre os temas vegetação e geologia em substratos quaternários da faixa litorânea do Brasil oriental, com ênfase na região que se estende do norte do estado de Santa Catarina ao sul do estado de São Paulo. Para tanto foram utilizadas ferramentas de busca existentes no Portal de Periódicos da CAPES, incluindo os Bancos de Teses e Dissertações; no Google Acadêmico; bem como em outras bases bibliográficas relacionadas tais como ISI, CSA, ScienceDirect, CrossRef, Wilson Web, Scopus.

Em termos de material cartográfico, realizou-se um levantamento junto a instituições com atividades relacionadas à região supracitada, onde consultas presenciais foram efetuadas em bibliotecas e mapotecas de instituições de pesquisa (*e.g.* universidades etc.), órgãos governamentais (*e.g.* IBGE, INPE, IBAMA, CPRM, IAP, IEF, IPT, Secretarias Estaduais e Municipais etc.) e organizações não-governamentais. Extensas buscas virtuais foram também realizadas junto a portais de acesso a dados e bases espaciais na INTERNET.

De fundamental importância para o pleno desenvolvimento da interpretação das imagens de sensoriamento remoto, a reunião, análise e fotointrepretação parcial dos documentos disponíveis sobre a região (tab. 4.1) proporcionaram melhoras significativas ao mapeamento, enriquecendo a resolução espacial das fontes e trazendo valiosas informações sobre a evolução temporal dos fenômenos e o comportamento espectral dos alvos.

Tabela 4.1. Documentos fotográficos e cartográficos utilizados como apoio ao longo da interpretação das imagens.

DOCUMENTO	ESCALA	DATA	PRODUÇÃO
Cartas Topográficas	1:1.000.000 1:250.000 1:100.000 1:50.000	variadas	- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) - DSG (Diretoria de Serviços Geográficos - Ministério do Exército)
Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo	1:1.000.000	2004	- CPRM (Serviço Geológico do Brasil) - Programa Geologia do Brasil, folhas SI-22; SH-22; SG-22; SG-23; SF-23; SF-24; SE-24; SD-24; SC-24; SC-25; SB-24; SB-25; AS-23 e SA-24
Mapa de Vegetação	1:1.000.000	variadas	- Projeto RADAM Brasil, v. 21; 23; 24; 30; 32; 33 e 34
Mapa de Geologia	1: 250.000	inédito	- Projeto RADAM Brasil, v. 35 (esboço preliminar)
Mapa de Gemorfologia	1: 250.000	inédito	- Projeto RADAM Brasil, v. 35 (esboço preliminar)
Mapa de Pedologia	1: 250.000	inédito	- Projeto RADAM Brasil, v. 35 (esboço preliminar)
Carta de Utilização da Terra do Estado de São Paulo	1:250.000	1982	- IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo)
Carta Imagem de Satélite - Curitiba	1:250.000	1991	- ITCF (Instituto de Terras, Cartografia e |Florestas do Estado do Paraná) - INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais)
Remanescentes de Mata Atlântica e Ecossistemas Associados	1:250.000	1992	- Fundação SOS Mata Atlântica - INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais)
Mapeamento da Vegetação Natural do Estado de São Paulo	1:50.000	1989	- DEPRN (Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais) / SMA - (Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo) - Instituto Florestal / SP - FUNCATE (Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais)
Mapeamento da Floresta Atlântica do Estado do Paraná	1:50.000	2002	- Secretaria do Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Paraná - Programa Pró-Atlântica
Mapa de solos do litoral do Paraná	1:50.000	inédito	Curcio (esboço preliminar)
Fotoíndice - SP	1:80.000	1953	- Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A. - Departamento Nacional de Obras de Saneamento
Fotoíndice - PR	1:125.000	1953	- Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul - S.A. - IAP (Instituto Ambiental do Estado do Paraná)
Fotoíndice	1:100.000	1980	- Aerosul Levantamentos Aeroespaciais e Consultoria S.A.
Fotografias aéreas (estereopares)	1:25.000	1953	- Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul - S.A..
Fotografias aéreas (estereopares)	1:70.000	1962	- Aerosul Levantamentos Aeroespaciais e Consultoria S.A.
Fotografias aéreas (estereopares)	1:25.000	1980	- Aerosul Levantamentos Aeroespaciais e Consultoria S.A. - IAP (Instituto Ambiental do Estado do Paraná)

4.5.2. DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE ENTIDADES BIOLÓGICAS E DA HIERARQUIA DE MANCHAS

4.5.2.1. Definição das classes de entidades biológicas

As classes de entidades biológicas que são objeto de estudo neste capítulo representam diferentes expressões espaciais de entidades biológicas definidas como sistemas vegetacionais.

Como nosso interesse dirige-se à investigação da distribuição geográfica destes sistemas, as entidades que utilizaremos serão as suas projeções no espaço geográfico das diferentes escalas consideradas, para as quais adotamos os seguintes termos e definições (fig. 4.1):

Ecótopo: a menor unidade no espaço geográfico ocupada por um tipo de sistema vegetacional, uma mancha de um único tipo de sistema vegetacional.

Ecocomplexo: agregação de ecótopos, uma rede de manchas de vários sistemas vegetacionais.

Em alusão ao vocabulário empregado na hierarquização da drenagem (rios de 1ª, 2ª, ... *n*ª ordem), para as agregações de ecocomplexos utilizaremos as seguintes notações:

Ecocomplexo de 1ª ordem: agregação de ecótopos de um mesmo tipo de sistema vegetacional, uma rede de manchas de um único tipo de sistema vegetacional.

Ecocomplexo de 2ª ordem: agregação de ecocomplexos de 1ª ordem, uma rede de manchas de tipos diferentes de sistemas vegetacionais.

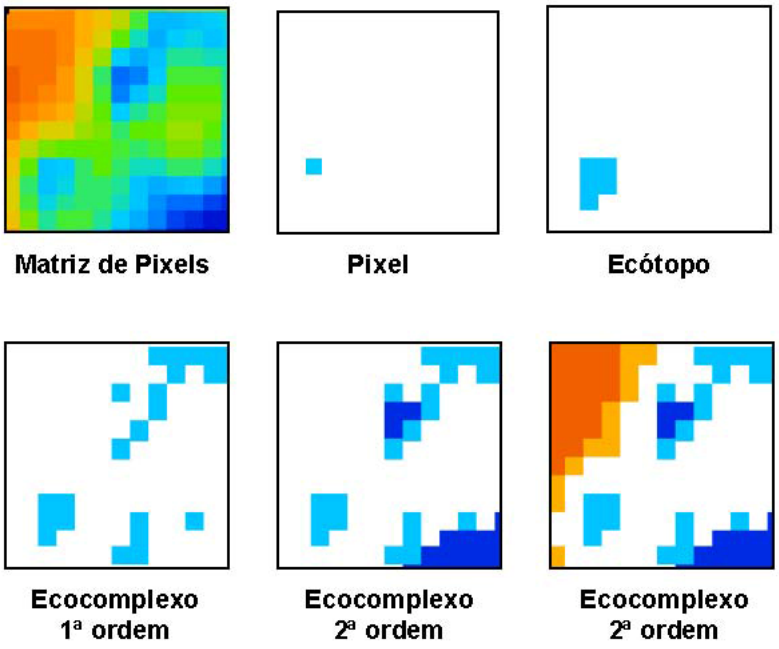


Figura 4.1. Representação esquemática das noções de *pixel*, ecótopo e ecocomplexos.

Cabe notar que a acepção de ecótopo adotada neste capítulo encontra-se mais próxima das definições de ZONNEVELD (1989); NAVEH e LIBERMANN (1994) e FORMAN (1995), utilizadas em Ecologia de Paisagem, onde o *ecótopo* representa a menor unidade espacialmente explícita de cobertura do solo, ou seja, a menor porção da superfície terrestre mais ou menos homogênea e claramente discernível e mapeável.

Esta noção difere substancialmente da acepção ecológica de WHITTAKER *et al.* (1973), que é mais associada à distribuição ao nível de espécie e populações, onde ecótopo representa a conjugação dos fatores de nicho e hábitat. Nesta concepção o nicho é definido como o conjunto dos fatores intracomunidades, isto é, aqueles dependentes da densidade, enquanto hábitat é entendido como um conjunto de fatores intercomunidades, ou seja, aqueles independentes da densidade, que em sua maioria são abióticos (WHITTAKER *et al.*, 1973; CERQUEIRA, 1995; *in prep.*).

Cumpre também ressaltar que a acepção de *ecocomplexo* adotada neste estudo, entendida como agregação de ecótopos, constitue uma adequação da conotação tradicional do termo ecocomplexo (BLANDIN e LAMOTE, 1988; GIREL, *et al*., 1997), dirigida a formular um conceito mais operacional para os objetivos desta investigação. A noção tradicional de ecocomplexo consiste em um nível de integração superior ao de ecossistema, representando por um arranjamento espacial de grupos de ecossistemas interativos, que partilham processos comuns de origem natural e antrópica.

Partindo destas definições das entidades de interesse, segue-se que o escopo deste capítulo focaliza os sistemas arbóreos desenvolvidos sobre superfícies quaternárias costeiras e, por conseqüência, toma como objeto de estudo as entidades biológicas representadas por ecótopos e ecocomplexos relativos a este tipo de sistemas.

Em uma abordagem escalar ascendente (*"bottom-up*"), partiremos dos ecótopos definidos na escala de maior detalhe para em seguida alcançar os ecocomplexos de 1ª e 2ª ordem, através de procedimentos de agregação.

As entidades biológicas de maior detalhe, os ecótopos, são delimitadas a partir da agregação de *pixels* de uma mesma categoria, a partir de procedimentos com operadores de vizinhança. O *pixel* constitui o menor elemento de uma imagem matricial classificada, sendo a unidade que representa o maior nível de detalhe do conjunto de dados espacializado. Contudo, o *pixel* em si não apresenta significado biológico e faz-se necessário delimitar entidades de semântica biótica para que estas possam atuar como unidades operacionais significantes na passagem de escalas.

4.5.2.2. Desenho da hierarquia de manchas

Para desenvolver o arcabouço metodológico-operacional deste capítulo tomou-se como base teórico-conceitual a Dinâmica Hierárquica de Manchas, implementada através da

estratégia de modelagem em múltiplas escalas, ou seja, a abordagem de "escada escalar" proposta em Wu (1999) e Wu e Davis (2002). A estratégia compreende três etapas: (1) identificar a hierarquia de manchas adequada; (2) fazer observações e desenvolver modelos em níveis focais e (3) extrapolar informação de forma hierárquica através dos diferentes domínios escalares. A base operacional para o desenvolvimento desta metodologia foi construída em ambiente georreferenciado, utilizando Sistemas Geográficos de Informação para integrar diversas ferramentas de análise e modelagem.

Seguindo recomendações da literatura (O'NEILL *et al*.,1986; BURNETT e BLASHKE, 2003), o desenho da arquitetura para a hierarquia de manchas foi definido em três níveis, empregados como "escada escalar" para o trânsito de dados e informação entre os domínios de escala e para o desenvolvimento e aplicação de modelos nos níveis focais.

Partindo destas diretrizes a arquitetura desenhada para servir de arcabouço multiescalar hierárquico para o estudo de caso da distribuição dos ecossistemas alvo apresentou a configuração descrita no tabela abaixo (tab. 4.2).

Tabela 4.2. Arquitetura de níveis para o estudo da distribuição de sistemas arbóreos do Domínio da Mata Atlântica em terrenos quaternários costeiros.

Nível hierárquico	*Nível de organização biológica*	*Escala espacial e de gestão*
Nível + 1	Ecocomplexo de 2ª ordem	extensão – paisagem global macrorregional/bioma/continental grão - 500m a 1km
Nível 0	Ecocomplexo de 1ª ordem	extensão – paisagem regional grão - 30 a 90m
Nível – 1	Ecótopo	extensão - paisagem local grão - 1 a 30m

4.5.2.3. Definição das classes de ecótopos

O primeiro passo para a delimitação dos ecótopos consiste na definição das classes destas entidades observáveis, o que requer a adoção de algum sistema classificatório.

Uma classificação pode ser definida como um ordenamento de objetos em grupos ou conjuntos com base em seu relacionamento (SOKAL, 1974), sendo que tal esquema descreve o arcabouço sistemático com os nomes das classes, os critérios usados para distingui-las e o relacionamento entre as classes. Tal sistema requer a definição de limites de classe, que idealmente devem ser claros, precisos e baseados em critérios objetivos.

No caso de *mapeamentos de cobertura do solo,* a classificação constitui uma representação abstrata da situação que ocorre na superfície terrestre, obtida através do uso de critérios diagnósticos bem definidos, que são denominados classificadores. O mapeamento de *cobertura do solo*, em função de sua ênfase na tipologia do revestimento da superfície, distingue-se daquele de *uso do solo*, que focaliza sobretudo a atividade antrópica e/ou econômica realizada sobre um tipo de cobertura. Neste ponto cabe então ressaltar que aqui *cobertura do solo* é entendida como a *cobertura bio(física) observada sobre a superficie da Terra*, o que em um sentido restrito designaria apenas as coberturas vegetacionais e as estruturas antrópicas. Contudo, na *praxis* do mapeamento e segundo o procedimento acadêmico usual, sob o termo cobertura do solo (*"land cover"*) são também incluídas as superfícies terrestres desnudas (rocha e solo expostos) e as superfícies líquidas.

O sistema de classificação de cobertura do solo adotado neste trabalho para definir as classes de ecótopos corresponde ao *"Land Cover Classification System"* - *LCCS* (DI GREGORIO, 2005), um sistema internacional desenvolvido pela FAO/UNEP. Tendo em vista que no Brasil dispomos de um sistema nacional de classificação de vegetação bastante consolidado, o "Sistema Fitogeográfico" proposto por VELOSO (1992) e adotado pelo IBGE (1992), para efeito de comparabilidade as classes de ecótopos resultantes foram também

relacionadas a este sistema de classificação. A seguir fornecemos descrições explanatórias sobre ambos os sistemas utilizados.

4.5.2.3.1. O Sistema de Classificação de Cobertura do Solo ("Land Cover Classification System" - LCCS)

A informação sobre cobertura do solo constitui um item essencial para o manejo sustentável dos recursos naturais e para a proteção ambiental, além de representar o fundamento para muitos programas ambientais, humanitários e de segurança alimentar da ONU e de diversas instituições internacionais e nacionais. Contudo, o acesso a bases de dados padronizadas e comparáveis sobre cobertura do solo constitui uma demanda ainda não atendida. Em resposta a esta necessidade a FAO e a UNEP iniciaram o Programa "Global Land Cover Network (GLCN)", com o objetivo de melhorar a disponibilidade de informação padronizada e confiável sobre cobertura dos solo e sua dinâmica de mudança, em nível nacional e global, sobretudo para usuários de países em desenvolvimento.

A metodologia do GLCN incluiu o desenvolvimento de um Sistema de Classificação de Cobertura do Solo ("Land Cover Classification System" - LCCS), criado como um sistema abrangente e padronizado de classificação *a priori* dirigido para atividades de mapeamento de cobertura e uso do solo. As características deste sistema serão descritas a seguir com base no material fornecido pelos seus criadores (DI GREGORIO e JANSEN, 1996; 1998; DI GREGORIO, 2005).

O projeto do LCCS teve como proposição reunir as exigências específicas do usuário na busca de uma padronização metodológica, com a finalidade de que os produtos assim gerados pudessem ser independentes da semântica utilizada para o mapeamento e até da densidade das informações coletadas, ou seja, independentes das classificações regionalmente adotadas e da escala de trabalho. Segundo seus criadores, este sistema pode ser usado para

qualquer iniciativa de classificação de cobertura do solo em qualquer lugar do mundo, visto que utiliza um conjunto de critérios diagnósticos independentes que permitem correlação com classificações e legendas existentes. No LCCS as classes de cobertura são definidas por uma combinação deste conjunto de caracteres diagnósticos independentes, denominados classificadores, que são hierarquicamente arranjados para assegurar um alto grau de acurácia geográfica.

Devido à heterogeneidade de coberturas terrestres, não se pode utilizar o mesmo conjunto de classificadores para definir todos os tipos de cobertura. Neste sentido, com vistas a reduzir a heterogeneidade entre intérpretes e entre interpretações ao longo do tempo, um programa vem sendo desenvolvido para facilitar o complexo processo de classificação e assegurar a padronização. Este software auxilia o usuário a selecionar as classes apropriadas através de um processo passo-a-passo, ou seja, um classificador de cada vez. O modo flexível em que a classificação é construída envolve a criação de classes em diferentes níveis do sistema, o que permite criar um número muito grande de classes, amplificado ainda pela possibilidade do uso opcional de combinações de modificadores, de atributos ambientais e de atributos técnicos específicos. Definições adicionais de classes de cobertura do solo podem ser alcançadas pela adição de atributos, dos quais os dois grupos seguintes formam níveis separados na classificação:

Atributos ambientais: atributos que influenciam a cobertura do solo, mas que não constituem características dos mesmos (*e.g.* clima, altitude, geomorfologia, solo, litologia etc.)

Atributos técnicos específicos: atributos associados a tecnicalidades de disciplinas específicas (e.g. aspectos florísticos, tipos de cultivo etc.)

A classificação apresenta duas etapas, sendo uma fases dicotômica inicial e outra modular-hierárquica subseqüente (fig. 4.2).

A fase dicotômica inicial apresenta três níveis de classificadores: presença de vegetação, condição edáfica e artificialidade da cobertura. No terceiro nível os grupos principais de coberturas são distinguidos em oito classes fundamentais (tab. 4.3).

Tabela 4.3. Níveis da fase dicotômica do *Land Cover Classification System (LCCS)*.

Land Cover Classification - Dichotomous Phase		
first level	**second level**	**third level**
Primarily Vegetated	Terrestrial	Managed and Cultivated Terrestrial Areas
		Natural and Semi-Natural Terrestrial Vegetation
	Aquatic or Regularly Flooded	Cultivated Aquatic Areas
		Natural and Semi-Natural Aquatic Vegetation
Primarily Non-Vegetated	Terrestrial	Artificial Surfaces
		Bare Areas
	Aquatic or Regularly Flooded	Artificial Water Bodies, Snow and Ice
		Natural Water Bodies, Snow and Ice

As oito classes fundamentais de cobertura podem ser desdobradas em classes mais detalhadas nos vários níveis da fase modular-hierárquica subseqüente, onde o conjunto de *classificadores puros* de cobertura é empregado para cada tipo principal, podendo ainda ser combinado com *atributos ambientais* (*e.g.* clima, solo etc.) e/ou *atibutos técnicos específicos* (*e.g.* aspectos florísticos, salinidade etc.) para prover informação adicional sobre a cobertura dos solo.

No primeiro nível hierárquico da fase modular todas as classes de cobertura do solo terrestres pertencentes ao grupo *Primariamente Vegetada* ("*Primarily Vegetated"*) são derivadas de uma abordagem conceitual fisionômico-estrutural consistente, que nos tipos *Vegetação Natural e Seminatural* ("*Natural and Seminatural Terrestrial Vegetation"*) combina os classificadores *Forma de Vida e Cobertura*, *Altura* e *Macropadrão Espacial*,

enquanto nos tipos *Área Cultivada ou Manejada* ("*Cultivated or Managed Terrestrial Areas"*) combina os classificadores *Forma de Vida* e *Aspectos Espaciais* (figs. 4.2 e 4.3). As classes componentes do grupo *Primariamente Não Vegetada* seguem uma abordagem similar, utilizando classificadores que tratam de aspectos da superfície, como distribuição ou densidade e altura ou profundidade da superfície.

O LCCS gera classes de cobertura do solo mutuamente excludentes, o que é garantido pelos três identificadores produzidos automaticamente para cada classe definida (tab. 4.4):

1. uma fórmula Booleana única, que constitui uma seqüência codificada dos classificadores utilizados (*"LCCS Formula"*);
2. um nome padrão (*"LCCS Label"*) e
3. um código numérico único (*"LCCS Code"*).

Tanto o código numérico quanto o nome padrão podem ser utilizados para construir automaticamente uma Legenda, na qual as classes que foram criadas são agrupadas segundo as principais categorias de coberturas e seus domínios, de acordo com o nível de detalhe correspondente. Esta nomenclatura resultante pode ser ligada a um nome definido pelo usuário em qualquer linguagem (*"LCCS User Label"*).

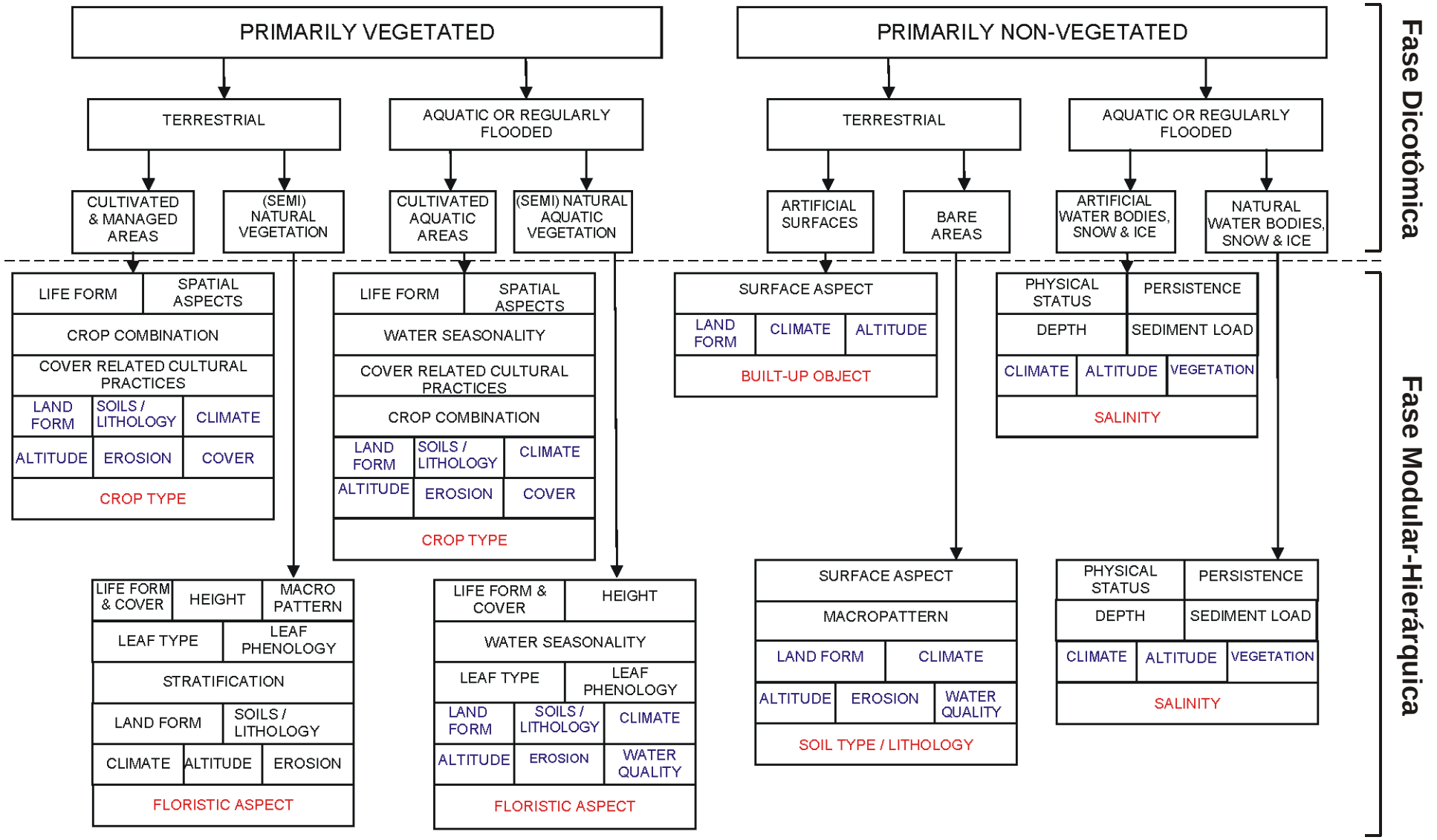


Figura 4.2. Esquema geral dos módulos e classificadores no *Land Cover Classification System (LCCS)*. Na segunda fase encontram-se os atributos ambientais em azul e os atributos técnicos específicos em vermelho. Fonte: Modificado de DI GREGORIO (2005).

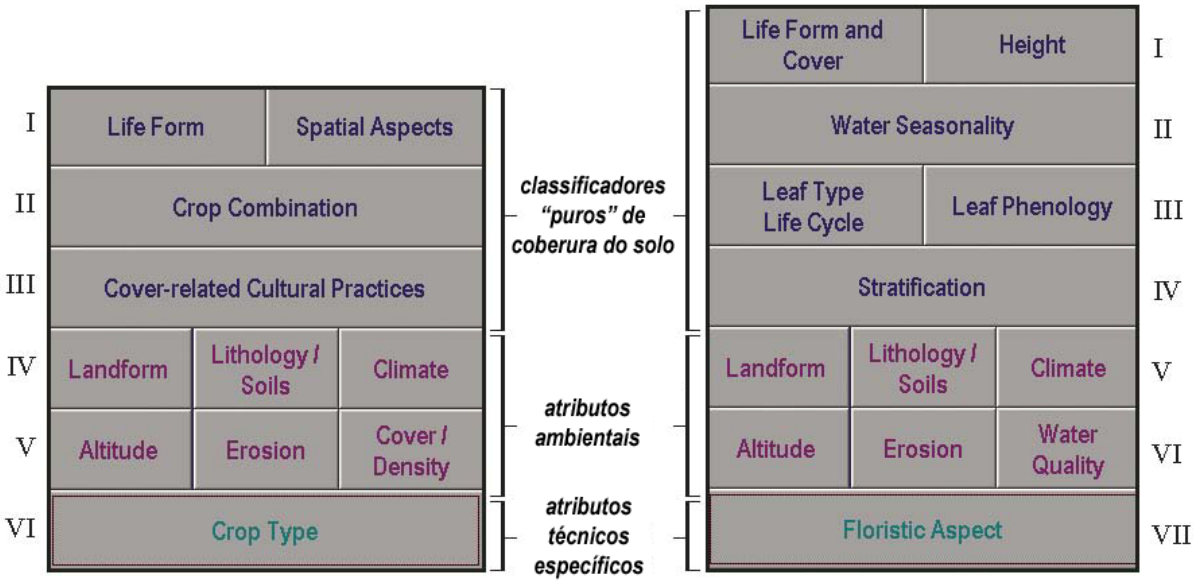


Figura 4.3. Exemplo do esquema dos classificadores e atributos utilizados no *LCCS* para os tipos *Área Cultivada ou Manejada* ("*Cultivated or Managed Terrestrial Areas"*) e *Vegetação Natural e Seminatural* ("*Natural and Semnatural Terrestrial Vegetation"*), respectivamente na esquerda e na direita. Fonte: Modificado de DI GREGORIO (2005).

Tabela 4.4. Exemplo de legenda mostrando os códigos de uma classe gerada a partir do software LCCS.

Land Cover Classification - Standard Description
Major Cover Type: Natural And Seminatural Primarily Terrestrial Vegetation
LCC Code
20597-52957(3)
LCC Formula
A3A10B2XXD1E1F2F5F7G2F2F5F10G2-B5G6G5
LCC Label
Multi-Layered Broadleaved Evergreen High Trees (With Second Layer Of Medium High Trees) with Emergents (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
LCC User Defined Label
Vegetação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico

Na concepção dos módulos do LCCS também foi incluída a possibilidade de correlacioná-lo a outros sistemas de classificação, o que permite a tradução entre classificações e legendas já existentes e o seu sistema de referência.

Esta funcionalidade foi utilizada neste estudo para efetuar a correspondência entre as classes de cobertura do solo geradas pelo LCCS e as classes associadas existentes no Sistema Fitogeográfico Brasileiro.

4.5.2.3.2. O Sistema Fitogeográfico Brasileiro

Desenvolvido desde a década de 1940 por Henrique Veloso, o Sistema Fitogeográfico Brasileiro adotado pelo IBGE incorpora os fundamentos do sistema concebido pelo Projeto RADAMBRASIL, assumindo a formação como unidade básica (VELOSO, 1992). Esta abordagem segue os conceitos de ELLENBERG e MUELLER-DOMBOIS (1967), que empregaram uma definição fisionômico-ecológica baseada nas formas de vida de RAUNKIER (1934) para subdividir a formação em um ordenamento hierárquico. Adequado para interpretações de sensoriamento remoto, o mapeamento na concepção desenvolvida no Projeto RADAMBRASIL é fisionômico, implicando uma classificação fitoecológica de formação delimitada pelos ambientes regionais. Os resultados do mapeamento sintetizam uma classificação hierárquica das formações, bem delimitadas por parâmetros do ambiente, sendo esquematizadas em uma chave concebida para a vegetação neotropical conforme conceitos da fitogeografia intertropical.

A primeira etapa separa os padrões de vegetação espontânea obtidos por sensoriamento remoto segundo sua estrutura fisionômica, determinada pelas formas de vida dominantes, em duas grandes classes de formação: florestal (macro e mesofanerófitos) e não-florestal (micro e nanofanerófitos, caméfitos, hemicriptófitos, geófitos e terófitos) (tab. 4.5).

Tomando agora apenas as unidades florestais, na próxima divisão a cada classe de formação segue-se uma subclasse, determinada ombrófila ou estacional pelo distinto comportamento ombrotérmico - o índice de BAGNOULS e GAUSSEN (1957), corroborado pela adaptação dos órgãos de crescimento das plantas como sistema de proteção ao déficit hídrico dos solos. Em seguida, determina-se o subgrupo de formação, higrófito ou xerófito, segundo o tipo de transpiração estomática foliar e a fertilidade do solo. A etapa consecutiva distingue o subgrupo de formação pela fisionomia derivada da conformação das plantas segundo seus hábitos. O processo então culmina na identificação das formações propriamente ditas, definidas pelos parâmetros ambientais que incluem clima, litologia, relevo e solos.

Cabe notar que as formações não-florestais (formações pioneiras, refúgios vegetacionais e comunidades de sucessão secundária) não seguem este ordenamento classificatório hierárquico, contudo sua determinação obedece aos mesmos fundamentos fitofisionômico-ecológicos.

A metodologia para se cartografar o Sistema Fitogeográfico brasileiro está adaptada a um mapeamento até a escala exploratória de 1:250.000, sendo que para mapeamentos de maior detalhe, em escalas de 1:100.000 e maiores, este sistema propõe que o esquema de classificação deve ser baseado em dados de fitossociologia (VELOSO, 1992) (tab. 4.6).

Tabela 4.5. Esquema de classificação do Sistema Fitogeográfico brasileiro até a escala exploratória. Fonte: VELOSO (1992).

De escala macrorregional (1:10 000 000 até 1: 2 500 000) até escala exploratória (1: 1 000 000 até 1: 250 000)							
IMPÉRIO FLORÍSTICO	Tipos de Vegetação	Formações					
ZONA	REGIÃO	CLASSES DE FORMAÇÕES	SUBCLASSES DE FORMAÇÕES	GRUPOS DE FORMAÇÕES	SUBGRUPOS DE FORMAÇÕES	FORMAÇÕES (Propriamente ditas)	SUBFORMAÇOES
		Estruture/Formas de vida	Clima Déficit hídrico	Fisidogia / transpiraçao e Fertilidade	Fisionomia (Hábitos)	Ambiente / relevo	Fisionomia específica (Fácies)
NEOTROPICAL Principais famílias endêmicas brasileiras: Bixaceae, Cactaceae, Cannaceae, Caryocaraceae, Cyclathaceae, Cyrillaceae, Lacistemaceae, Marcgraviaceae, Quinaceae, Sarraceniaceae e outras	Com 9 regiões florísticas, com 1 ou mais gêneros endêmicos em cada tipo de vegetação	FLORESTA (Macrofanerófitos Mesofanerófitos Lianas e Epífitos)	OMBRÓFILA (0 a 4 meses secos)	Higrófita (Distróficos e Eutróficos)	DENSA	Aluvial Terras baixas Submontana Montana Alto-montana	Dossel uniforme Dossel emergente
					ABERTA	Terras baixas Submontana Montana	Com Palmeiras Com cipó Com bambu Com sororoca
					MISTA	Aluvial Submontana Montana Alto-montana	Dossel uniforme Dossel emergente
		FLORESTA (Macrofanerófitos Mesofanerófitos Lianas e Epífitos)	ESTACIONAL (4 a6 meses secos ou com 3 meses abaixo de 15° C)	Higrófita/Xerófita (Álicos e Distróficos)	SEMIDECIDUAL	Aluvial Terras baixas Submontana Montana	Dossel uniforme Dossel emergente
				Higrófita (Xerófita e Eutróficos)	DECIDUAL	Aluvial Terras baixas Submontana Montana	Dossel uniforme Dossel emergente
		CAMPINARANA (Campinas) (Xeromórfitos, Nanofanerófitos, Caméfitos, Geófitos. Lianas e Epífitas)	OMBRÓFILA (0 a 2 meses secos)	Higrófita (Álicos e Distróficos)	FLORESTADA ARBORIZADA GRAMÍNEO-LENHOSA	Relevo tabular e/ou Depressão fechada	Com palmeiras Sem palmeiras
		SAVANA (Cerrado) (Xeromórfitos, Microfanerófitos, Nanofanerófitos, Caméfitos, Geófitos, Hemicriptófitos, Lianas e Epífitos)	ESTACIONAL (de O a 6 meses secos)	Higrófita (Álicos e Distróficos)	FLORESTADA ARBORIZADA PARQUE GRAMÍNEO-LENHOSA	Planaltos tabulares e/ou Planícies	Com floresta-de-galeria Sem floresta- de-galeria
		SAVANA ESTÉPICA (Caatinga, Chaco, Campos de Roraima e Parque de Espinilho de Quaraí) (Microfanerófitos, Nanofanerófitos, Caméfitos, Geófitos, Hemicriptófitos, Terófitos, Lianas e Epífitos)	ESTACIONAL (com mais de 6 meses secos ou com frio rigoroso)	Xerófita / Higrófita (Eutróficos)	FLORESTADA ARBORIZADA PARQUE GRAMÍNEO-LENHOSA	Depressão interplanáltica arrasada nordestina e/ou Depressão com acumulações recentes	Com floresta-de-galeria Sem floresta- de-galeria
		ESTEPE (Campanha gaúcha e Campos meridionais) (Nanofanerófitos, Caméfitos, Geófitos, Hemicriptófitos, Terófitos, Lianas e Epífitos)	ESTACIONAL (com 3 meses frios e 1 mês seco)	Higrófita / Xerófita (Eutróficos)	ARBORIZADA PARQUE GRAMÍNEO-LENHOSA	Planaltos e/ou Pediplanos	Com floresta-de-galeria Sem floresta- de-galeria

Tabela 4.6. Esquema de classificação do Sistema Fitogeográfico brasileiro para escalas de maior detalhe. Fonte: VELOSO (1992).

Escalas de Semidetalhe e Detalhe (1:100 000 até 1:25 000) e (maior que 1:25 000)							
IMPÉRIO FLORÍSTICO		ECOLOGIA					
		Fitossociologia					BIOECOLOGIA
DOMÍNIO	SETOR	COMUNIDADES					
		Associações	Subassociações	Variante	Fácies	Sociação	Ecossistema
Para cada Região Ecológica podem existir vários domínios florísticos, com 1 ou mais espécies endêmicas, a serem determinadas no detalhamento da comunidade	Dentro das associações existem Variedades que determinam os vários ambientes da comunidade	Associação: é a menor unidade da comunidade, delimitada pela relação espécie / área mínima correspondente à unidade básica da classificação fitossociológica	Subassociações: diferencia-se da associação padrão por faltarem alguns taxa característicos	Variante: diferencia-se do padrão da associação por apresentar maior abundância de determinados taxa	Fácies: caracteriza-se por apresentar uma combinação particular de espécies mais ou menos casual	Sociação ou Consorciação: é uma parcela homogênea da associação caracterizada por um aglomerado específico	ECOSSISTEMA ou BIOGEOCENOSE: é um conjunto associativo, com organização trófica e um tipo de metabolismo definido

4.5.2.3.3. Construção da legenda para o mapeamento dos ecótopos

Uma *legenda* é a aplicação de um sistema classificatório em uma determinada área, com base em uma escala de mapeamento definida e em um conjunto de dados específico. Conseqüentemente, uma legenda pode conter apenas um subconjunto de todas as classes possíveis dentro da classificação, sendo, portanto, dependente da escala e da representação cartográfica, bem como dos dados e da metodologia de mapeamento.

De acordo com a análise do material bibliográfico e cartográfico reunido, conforme descrito anteriormente, a legenda para o mapeamento dos ecótopos foi construída com base no Sistema de Classificação de Cobertura do Solo da FAO/GLCN, através da utilização do software LCCS.

4.5.2.3.3.1. Modo de ativação e classificador pedológico utilizados

A operação do LCCS seguiu o Modo de Ativação 1 para as coberturas do grupo *Primariamente Vegetada* e o Modo de Ativação 0 para as coberturas do grupo *Primariamente Não Vegetada*.

Para as coberturas do grupo *Primariamente Vegetada* utilizou-se um classificador adicional relativo a um atributo ambiental, representado pelo componente pedológico. Este classificador foi representado por uma seqüência alfanumérica iniciando pela letra "Z" (código do classificador), seguida de um código numérico (um algarismo ou uma combinação de algarismos) para definir os tipos de solo envolvidos. A nomenclatura e definição dos tipos de solo correspondem ao sistema de classificação brasileiro (EMBRAPA, 1999; 2006). Os códigos numéricos indicativos dos tipos de solos encontram-se abaixo relacionados:

(1) Cambissolo

(2) Cambissolo gleico

(3) Espodossolo hidromófico

(4) Espodossolo não-hidromófico

(5) Organossolo

(6) Neossolo Quartzarênico hidromórfico

(7) Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico

(8) Neossolo Flúvico

(9) Gleissolo

(10) Gleissolo tiomórfico

A título de exemplo, um ecótopo com atributo pedológico "Espodossolo não-hidromórfico" toma a seqüência alfanumérica "Z4", enquanto outro ecótopo associado à combinação "Espodossolo hidromófico e/ou Organossolo" é codificado pela seqüência "Z35".

O classificador de atributo pedológico foi criado com a orientação das informações providas pelo Dr. Gustavo Curcio, do Centro Nacional de Pesquisas de Florestas da EMBRAPA. A principal base de apoio para associar os tipos de solo aos sistemas vegetacionais consistiu em um mapa pedológico de autoria do Dr. Curcio, ainda inédito, produzido para boa parte do litoral paranaense. O mapa analógico utilizado para a consulta consistiu em esboço preliminar de traçado compatível com escala de 1:50000.

A seguir apresenta-se uma caracterização resumida dos tipos de solo envolvidos segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 1999; 2006), bem como uma tentativa de correspondência com os sistemas de classificações internacionais da Soil Taxonomy (USDA, 1999) e da FAO (1998; 2006), que adota o World Reference Base for Soil Resources, reconhecido pela International Union of Soil Science.

Cambissolos - Solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, exceto hístico com 40cm ou mais de espessura, ou horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta. Plintita e petroplintita, horizonte glei e horizonte vértico, se presentes, não satisfazem os requisitos para Plintossolos, Gleissolos e Vertissolos, respectivamente. Os *Cambissolos gleicos* ou gleissólicos apresentam horizonte glei abaixo do horizonte B incipiente, dentro de 120cm da superfície do solo. Os *Cambissolos* correspondem aos *Cambisols* da classificação da FAO/WRB e aos *Inceptisols* da Soil Taxonomy.

Espodossolos - Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B espódico, imediatamente abaixo de horizonte E, A, ou horizonte hístico, dentro de 200cm da superfície do solo, ou de 400cm, se a soma dos horizontes A+E ou dos horizontes hístico (com menos de 40 cm) + E ultrapassar 200cm de profundidade. Os *Espodossolos hidromomórficos* são solos que permanecem saturados com água em um ou mais horizontes, dentro de 100cm da superfície do solo, durante algum tempo na maioria dos anos. Os *Espodossolos* correspondem aos *Podzols* da classificação da FAO/WRB e aos *Spodosols* da Soil Taxonomy. No presente estudo, utilizamos a denominação *Espodossolos não-hidromórficos* para designar espodossolos que apresentam pouco ou nenhum grau de hidromorfia.

Organossolos - Solos constituídos por material orgânico (teor de carbono orgânico maior ou igual a 80 g/kg de TFSA), que apresentam horizonte hístico, satisfazendo os seguintes critérios:

a) 60cm ou mais de espessura se 75% (expresso em volume) ou mais do material orgânico consiste de tecido vegetal na forma de restos de ramos finos, raízes finas, cascas de árvores etc., excluindo as partes vivas; ou

(b) solos que estão saturados com água no máximo por 30 dias consecutivos por ano, durante o período mais chuvoso, com horizonte O hístico, apresentando as seguintes espessuras: (1) 20cm ou mais, quando sobrejacente a um contato lítico ou a material fragmentar constituído por 90% ou mais (em volume) de fragmentos de rocha (cascalhos, calhaus e matacões); ou (2) 40cm ou mais quando sobrejacente a horizontes A, B ou C; ou

(c) solos saturados com água durante a maior parte do ano, na maioria dos anos, a menos que artificialmente drenados, apresentando horizonte H hístico com a seguinte espessura: 1) 40cm ou mais, quer se estendendo em seção única a partir da superfície do solo, quer tomado cumulativamente dentro dos 80cm superficiais.

Os *Organossolos* correspondem aos *Histosols* em ambos os sistemas, FAO/WRB e Soil Taxonomy.

Neossolos - Solos pouco evoluídos constituídos por material mineral, ou por material orgânico com menos de 20cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Horizontes glei, plíntico, vértico e A chernozêmico, quando presentes, não ocorrem em condição diagnóstica para as classes Gleissolos, Plintossolos, Vertissolos e Chernossolos, respectivamente. *Neossolos Quartzarênicos* são solos sem contato lítico dentro de 50cm de profundidade, com seqüência de horizontes A-C, porém apresentando textura areia ou areia franca em todos os horizontes até, no mínimo, a profundidade de 150cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico; são essencialmente quartzosos, tendo nas frações areia grossa e areia fina 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala e, praticamente, ausência de minerais primários alteráveis (menos resistentes ao intemperismo). Já os *Neossolos Quartzarênicos hidromórficos* apresentam presença de lençol freático elevado durante grande parte do ano, na maioria dos anos, sendo imperfeitamente ou mal drenados. *Neossolos Flúvicos* são solos derivados de sedimentos aluviais e que apresentam caráter flúvico. Horizonte glei, ou horizontes de coloração pálida, variegada ou com mosqueados abundantes ou comuns de redução, se ocorrerem abaixo do horizonte A, devem estar a profundidades superiores a 150cm. Os *Neossolos Quartzarênicos* correspondem aos *Arenosols* da classificação da FAO/WRB e aos *(Quartzipsamments)* da Soil Taxonomy, enquanto os *Neossolos Flúvicos* correlacionam-se aos *Fluvisols* e aos *(Fluvents)* destes mesmos sistemas.

Gleissolos - Solos constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 150cm da superfície, imediatamente abaixo de horizonte A ou E, ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos, não

apresentando horizonte vértico ou horizonte B textural com mudança textural abrupta acima ou coincidente com horizonte glei, tampouco qualquer outro tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte glei, ou textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes até a profundidade de 150cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico. Horizonte plíntico se presente deve estar à profundidade superior a 200cm da superfície do solo. Denominam-se *Gleissolos tiomórficos* aqueles que apresentam horizonte sulfúrico e/ou materiais sulfídricos, dentro de 100cm a partir da superfície. Os *Gleissolos* correspondem aos *Gleysols* da classificação da FAO/WRB e aos *Entisols* da Soil Taxonomy.

4.5.2.3.3.2. Composição final da legenda

Ao final do processo de construção da legenda, foram definidas 32 classes de coberturas do solo singulares, que estão abaixo caracterizadas de acordo com as codificações e descrições geradas pelo *Land Cover Classification System*, bem como segundo as respectivas classificações e correspondências com o Sistema Fitogeográfico nacional adotado pelo IBGE (tab. 4.7).

Posteriormente, após a fase de classificação das imagens orbitais de sensoriamento remoto, a legenda sofreu revisão para acomodar agregações de classes que se fizeram necessárias em função da ocorrência de legendas mistas, apresentando uma composição final com as 23 classes de cobertura do solo relacionadas no tabela 4.8.

Tabela 4.7. Legenda para as classes singulares de cobertura do solo. Para cada rótulo de legenda segue-se a fórmula booleana, o rótulo e a descrição padrão no Sistema de Classificação de Cobertura do Solo LCCS da FAO/GLCN, bem como o código, o rótulo e a descrição no Sistema Fitogeográfico Brasileiro do IBGE.

Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo	
LCCS	*A3A10B2XXD1E1F2F5F7G2F2F5F10G2-B5G6G5(Z1)*
	Multi-Layered Broadleaved Evergreen High Trees (With Second Layer Of Medium High Trees) with Emergents on Cambisols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de >30 - 14m. A segunda camada consiste de cobertura fechada a aberta de árvores, que formam um estrato separado devido a uma diferença de altura, que alcança entre 14 - 7m. A terceira camada consiste de árvores emergentes esparsas, mais altas do que o estrato principal. A cobertura desenvolve-se sobre Cambissolo.
IBGE	*Da*
	Floresta Ombrófila Densa Aluvial
	Formação com três estratos de macro e mesofanerófitos; ombrófilos, com órgaos de crescimento sem proteção a déficit hídrico; higrófitos; com fisionomia densa e homogênea; ocorrendo sobre terraços fluviais.
Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo	
LCCS	*A3A10B2XXD1E1F2F5F7G2F2F5F10G2-B5G6G5(Z35)*
	Multi-Layered Broadleaved Evergreen High Trees (With Second Layer Of Medium High Trees) with Emergents on hydromorphyc Podzols or Histosols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de >30 - 14m. A segunda camada consiste de cobertura fechada a aberta de árvores, que formam um estrato separado devido a uma diferença de altura, que alcança entre 14 - 7m. A terceira camada consiste de árvores emergentes esparsas, mais altas do que o estrato principal. A cobertura desenvolve-se sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo.
IBGE	*Db*
	Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas
	Formação com três estratos de macro e mesofanerófitos; ombrófilos; higrófitos; com fisionomia densa e homogênea; ocorrendo em altitudes de até 30m.
Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico	
	A3A10B2XXD1E1F2F5F7G2F2F5F10G2-B5G6G5(Z4)
	Multi-Layered Broadleaved Evergreen High Trees (With Second Layer Of Medium High Trees) with Emergents on non-hydromorphyc Podzols (Mode

	1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de >30 - 14m. A segunda camada consiste de cobertura fechada a aberta de árvores, que formam um estrato separado devido a uma diferença de altura, que alcança entre 14 - 7m. A terceira camada consiste de árvores emergentes esparsas, mais altas do que o estrato principal. A cobertura desenvolve-se sobre Espodossolo não-hidromórfico.
IBGE	*Db*
	Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas
	Formação com três estratos de macro e mesofanerófitos; ombrófilos; higrófitos; com fisionomia densa e homogênea; ocorrendo em altitudes de até 30m.
Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo	
LCCS	*A3A10B2XXD1E1F2F5F7G2F1-B6G7(Z35)*
	Multi-Layered Broadleaved Evergreen Medium High Trees (With Second Layer Of Low Trees) on hydromorphyc Podzols or Histosols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de 14 - 7m. A segunda camada consiste de cobertura fechada a aberta de árvores, que formam um estrato separado devido a uma diferença de altura, que alcança entre 7 - 3m. A terceira está ausente. A cobertura desenvolve-se sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo.
IBGE	*Pma*
	Formação Pioneira com Influência Marinha Arbórea
	Formação de microfanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação marinha.
Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico	
LCCS	*A3A10B2XXD1E1F2F5F7G2F1-B6G7(Z4)*
	Multi-Layered Broadleaved Evergreen Medium High Trees (With Second Layer Of Low Trees) on non-hydromorphyc Podzols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de 14 - 7m. A segunda camada consiste de cobertura fechada a aberta de árvores, que formam um estrato separado devido a uma diferença de altura, que alcança entre 7 - 3m. A terceira está ausente. A cobertura desenvolve-se sobre Espodossolo não-hidromórfico.
IBGE	*Pma*
	Formação Pioneira com Influência Marinha Arbórea
	Formação de microfanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação marinha.
Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico	
	A3A10B2XXD1E1F2F5F10G2-B6G7(Z10)

	Multi-Layered Broadleaved Evergreen Low Trees (With Second Layer Of Medium High Trees) on tiomorphyc Gleisols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura está na amplitude de 7 - 3m. A segunda camada consiste de cobertura fechada a aberta de árvores que formam um estrato separado devido a uma diferença de altura, que alcança entre 14 - 7m. A terceira está ausente. A cobertura desenvolve-se sobre Gleissolo tiomórfico.
IBGE	*Pfa*
	Formação Pioneira com Influência Fluviomarinha Arbórea
	Formação de microfanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação fluviomarinha.
Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico	
	A3A10B2XXD1E1F2F5F7G2F1-B6G7(Z982)
LCCS	*Multi-Layered Broadleaved Evergreen Medium High Trees (With Second Layer Of Low Trees) on Gleisols, Fluvisols or gleic Cambisols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)*
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de 14 - 7m. A segunda camada consiste de cobertura fechada a aberta de árvores, que formam um estrato separado devido a uma diferença de altura, que alcança entre 7 - 3m. A terceira está ausente. A cobertura desenvolve-se sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico.
IBGE	*Paa*
	Formação Pioneira com Influência Fluvial e/ou Lacustre Arbórea
	Formação de microfanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação fluvial e/ou lacustre.
Formação Arbórea Média secundária intermediária	
	A3A10B2XXD1E1F2F5F7G2F1-B6G7
LCCS	*Multi-Layered Broadleaved Evergreen Medium High Trees (With Second Layer Of Low Trees) (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)*
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de 14 - 7m. A segunda camada consiste de cobertura fechada a aberta de árvores, que formam um estrato separado devido a uma diferença de altura, que alcança entre 7 - 3m. A terceira está ausente. A cobertura não está associada ao substrato pedológico.
IBGE	*Vs-IV*
	Vegetação Secundária Fase IV
	Formação de microfanerófitos; de sistema secundário; fase intermediária (capoeira).
Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico	
	A3A10B2XXD1E1F1-B7(Z4)
	Broadleaved Evergreen Low Trees, Single Layer, on non-hydromorphyc Podzols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)

	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de 7 - 3m. A vegetação consiste de uma única camada. A cobertura desenvolve-se sobre Espodossolo não-hidromórfico.
IBGE	*Pma*
	Formação Pioneira com Influência Marinha Arbórea
	Formação de microfanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação marinha.
Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo tiomórfico	
LCCS	*A3A10B2XXD1E1F1-B7(Z10)*
	Broadleaved Evergreen Low Trees, Single Layer, on tiomorphyc Gleisols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de 7 - 3m. A vegetação consiste de uma única camada. A cobertura desenvolve-se sobre Gleissolo tiomórfico.
IBGE	*Pfa*
	Formação Pioneira com Influência Fluviomarinha Arbórea
	Formação de microfanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação fluviomarinha.
Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico	
LCCS	*A3A10B2XXD1E1F1-B7(Z982)*
	Broadleaved Evergreen Low Trees, Single Layer, on Gleisols, Fluvisols or gleic Cambisols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de 7 - 3m. A vegetação consiste de uma única camada. A cobertura desenvolve-se sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico.
IBGE	*Paa*
	Formação Pioneira com Influência Fluvial e/ou Lacustre Arbórea
	Formação de microfanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação fluvial e/ou lacustre.
Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo	
LCCS	*A3A10B2XXD1E1F1-B7(Z5)*
	Broadleaved Evergreen Low Trees, Single Layer, on Histosols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de 7 - 3m. A vegetação consiste de uma única camada. A cobertura desenvolve-se sobre Organossolo.
	Paa
	Formação Pioneira com Influência Fluvial e/ou Lacustre Arbórea
	Formação de microfanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação fluvial e/ou lacustre.

Formação Arbórea Baixa secundária intermediária	
LCCS	*A3A10B2XXD1E1F1-B7*
	Broadleaved Evergreen Low Trees, Single Layer (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada de árvores perenifólias latifoliadas. A cobertura de copas é superior a 70-60%. A altura média está na amplitude de 7 - 3m. A cobertura não está associada ao substrato pedológico.
IBGE	*Vs-IV*
	Vegetação Secundária Fase IV
	Formação de microfanerófitos; de sistema secundário; fase intermediária (capoeira).
Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico	
LCCS	*A4A20B3XXD1E1F1-B14(Z7)*
	Broadleaved Evergreen Medium To High Closed to Open Thicket or Shrub, Single Layer, on non-hydromorphyc Arenosols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de arbustos perenifólios latifoliados (“thicket”). A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude de 5 a 0,3m. A vegetação consiste de uma única camada. A cobertura desenvolve-se sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico.
IBGE	*Pmb*
	Formação Pioneira com Influência Marinha Arbustiva
	Formação de nanofanerófitos; higrófitos/xerófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação marinha.
Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico	
LCCS	*A4A20B3XXD1E1F1-B14(Z6)*
	Broadleaved Evergreen Medium To High Closed to Open Thicket or Shrub, Single Layer, on hydromorphyc Arenosols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de arbustos perenifólios latifoliados (“thicket”). A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude de 5 a 0,3m. A vegetação consiste de uma única camada. A cobertura desenvolve-se sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico.
IBGE	*Pmb*
	Formação Pioneira com Influência Marinha Arbustiva
	Formação de nanofanerófitos; higrófitos/xerófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação marinha.
Formação Arbustiva sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo	
LCCS	*A4A20B3XXD1E1F1-B14(Z589)*

	Broadleaved Evergreen Medium To High Closed to Open Thicket or Shrub, Single Layer, on Histosols, Fluvisols or Gleisols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de arbustos perenifólios latifoliados (“thicket”). A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude de 5 a 0,3m. A vegetação consiste de uma única camada. A cobertura desenvolve-se sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo.
IBGE	*Pab*
	Formação Pioneira com Influência Fluvial e/ou Lacustre Arbustiva
	Formação de nanofanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação fluvial e/ou lacustre.
Formação Arbustiva sobre Gleissolo tiomórfico	
LCCS	*A4A20B3XXD1E1F1-B14(Z10)*
	Broadleaved Evergreen Medium To High Closed to Open Thicket or Shrub, Single Layer, on tiomorphyc Gleisols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de arbustos perenifólios latifoliados (“thicket”). A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude de 5 a 0,3m. A vegetação consiste de uma única camada. A cobertura desenvolve-se sobre Gleissolo tiomórfico.
IBGE	*Pfb*
	Formação Pioneira com Influência Fluviomarinha Arbustiva
	Formação de nanofanerófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação fluviomarinha.
Formação Arbustiva secundária inicial	
LCCS	*A4A20B3XXD1E1F1-B14*
	Broadleaved Evergreen Medium To High Closed to Open Thicket or Shrub, Single Layer (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de arbustos perenifólios latifoliados (“thicket”). A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude de 5 a 0,3m. A vegetação consiste de uma única camada. A cobertura não está associada ao substrato pedológico.
IBGE	*Vs-III*
	Vegetação Secundária Fase III
	Formação de nanofanerófitos; de sistema secundário; fase inicial (capoeira rala).
Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico	
	A2A20B4(Z7)
	Herbaceous Closed to Open Vegetation on non-hydromorphyc Arenosols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de vegetação herbácea. A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude

	de 3 a 0,03m. A cobertura desenvolve-se sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico.
	Pmh
IBGE	*Formação Pioneira com Influência Marinha Herbácea*
	Formação de caméfitos, hemicriptófitos, geófitos e/ou terófitos; higrófitos/xerófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação marinha.
Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico	
	A2A20B4(Z6)
LCCS	*Herbaceous Closed to Open Vegetation on hydromorphyc Arenosols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)*
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de vegetação herbácea. A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude de 3 a 0,03m. A cobertura desenvolve-se sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico.
	Pmh
IBGE	*Formação Pioneira com Influência Marinha Herbácea*
	Formação de caméfitos, hemicriptófitos, geófitos e/ou terófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação marinha.
Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo	
	A2A20B4(Z589)
LCCS	*Herbaceous Closed to Open Vegetation on Histosols, Fluvisols or Gleisols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)*
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de vegetação herbácea. A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude de 3 a 0,03m. A cobertura desenvolve-se sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo.
	Pah
IBGE	*Formação Pioneira com Influência Fluvial e/ou Lacustre Herbácea*
	Formação de caméfitos, hemicriptófitos, geófitos e/ou terófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação fluvial e/ou lacustre.
Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico	
	A2A20B4(Z10)
	Herbaceous Closed to Open Vegetation on tiomorphyc Gleisols (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de vegetação herbácea. A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude de 3 a 0,03m. A cobertura desenvolve-se sobre Gleissolo tiomórfico.
IB	*Pfh*

	Formação Pioneira com Influência Fluviomarinha Herbácea
	Formação de caméfitos, hemicriptófitos, geófitos e/ou terófitos; higrófitos; de primeira ocupação edáfica; ocorrendo sobre substratos de acumulação fluviomarinha.
Formação Herbácea secundária inicial	
LCCS	*A2A20B4*
	Herbaceous Closed to Open Vegetation (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A camada principal consiste de cobertura fechada a aberta de vegetação herbácea. A cobertura está entre 100 a 15%. A altura média está na amplitude de 3 a 0,03m. A cobertura não está associada ao substrato pedológico.
IBGE	*Vs-I,II*
	Vegetação Secundária Fases I e II
	Formação caméfitos, hemicriptófitos, geófitos e/ou terófitos; de sistema secundário; fase inicial (capoeirinha).
Cultivo arbóreo	
LCCS	*A1-S2*
	Tree Crop(s) - Non-Food Crops (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A cobertura consiste de áreas com cultivo plantas arbóreas. Cultivo não-alimentício.
IBGE	*R*
	Reflorestamento
	Áreas antrópicas de reflorestamento.
Cultivo não-graminóide	
LCCS	*A5-S1*
	Non-Graminoid Crop(s) - Food Crops (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A cobertura consiste de áreas com cultivo de plantas herbáceas não-graminóides. Cultivo alimentício.
IBGE	*A*
	Áreas de Agricultura
	Áreas antrópicas de agricultura.
Cultivo graminóide	
LCC	*A4-S1*
	Graminoid Crop(s) - Food Crops (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)

	A cobertura consiste de áreas com cultivo de plantas herbáceas graminóides. Cultivo alimentício.
IBGE	*A*
	Áreas de Agricultura
	Áreas antrópicas de agricultura.
Pastagem	
LCCS	A4-S7
	Graminoid Crop(s) - Fooder Crops (Mode 1: Terrestrial and/or Acquatic or regularly Flooded)
	A cobertura consiste de áreas com cultivo de plantas herbáceas graminóides. Cultivo de forrageiras.
IBGE	*Ap*
	Áreas de Pecuária
	Áreas antrópicas de pecuária.
Praia	
LCCS	A6(Mode 0)
	Loose And Shifting Sands
	A cobertura consiste de areia solta ou móvel.
IBGE	-
	-
	-
Solo Exposto	
LCCS	*A5(Mode 0)*
	Bare Soil And/Or Other Unconsolidated Material(s)
	A cobertura consiste de solo exposto e/ou outros materiais não-consolidados.
	-
	-
	-
Estruturas lineares (estradas, linhas de transmissão etc.)	
L (	*A3(Mode 0)*

IBGE	*Linear Built Up Area(s)*
	A cobertura consiste de áreas construídas lineares que podem ser posteriormente caracterizadas como rodovias (pavimentadas ou não-pavimentadas); ferrovias; linhas de transmissão ou dutos.
	-
	-
	-
Área urbana	
LCCS	*A4-A13(Mode 0)*
	Urban Area(s)
	A cobertura consiste de áreas construídas não-lineares urbanas ou industriais. A densidade de superfície impermeável pode ser especificada posteriormente em alta, média, baixa ou esparsa.
IBGE	*Au*
	Áreas urbanas
	Áreas antrópicas urbanas.
Superfície líquida	
LCCS	*A1(Mode 0)*
	Waterbodies
	A cobertura consiste de corpos d’água, que podem ser posteriormente caracterizados como naturais ou artificiais; lóticos ou lênticos; perenes ou intermitentes.
IBGE	-
	-
	-

Tabela 4.8. Legenda final com as classes de cobertura do solo incluindo as classes mistas.

1. Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo

legenda mista com presença de Formação Arbórea Média secundária intermediária; Formação Arbórea Baixa secundária intermediária

2. Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo

3. Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico

4. Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico

5. Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleicos

legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo

6. Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo

legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico

7. Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico

legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo

8. Formação Arbórea Média secundária intermediária

9. Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico

10. Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo tiomórfico

11. Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo

12. Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico

legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo

13. Formação Arbórea Baixa secundária intermediária

14. Formação Arbustiva sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo

15. Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico

legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico; Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico e Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico hidromórficos

16. Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo

17. Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – marismas e brejos de maré

legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Gleissolo tiomórfico

18. Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – zona de <u>Cladium</u>

legenda mista com presença de Solo Exposto

19. Cultivo arbóreo

20. Cultivo não graminóide

21. Cultivo graminóide

legenda mista com presença de Pastagem; Formação Herbácea secundária inicial e Formação Arbustiva secundária inicial

22. Superfície terrestre não-vegetada

Área urbana em legenda mista com presença de Solo Exposto; Estruturas lineares e Praia

23. Superfície líquida

4.5.4. CRIAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS

Os bancos de dados geográficos (BDGs) construídos para representar os dois recortes territoriais descritos na área de estudo foram elaborados de forma a armazenar os dados relevantes para a realização do trabalho proposto neste capítulo. Para cada recorte envolvido os BDGs foram definidos com os parâmetros técnicos descritos abaixo.

4.5.4.1. Recorte 1: Terrenos Quaternários no Domínio da Mata Atlântica

Sistema cartográfico no ambiente digital: cooordenadas geodésicas no Sistema LatLong, *datum* World Geodetic System 1984 -WGS84.

Sistema de projeção cartográfica para impressão: projeção Policônica, latitude de origem 0° e longitude de origem 54° Oeste, Elipsóide UGGI67, *datum* Planialtimétrico Sul Americano 1969 (South American Datum - SAD69).

Resolução: 15", aproximadamente 500m

Retângulo envolvente: Longitudes de -58,0085173 a -34,2214509 e Latitudes de -35,0443304 a -2,0661919.

Dimensões da matriz: 5290 colunas e 7334 linhas.

4.5.4.2. Recorte 2: Região costeira sul-sudeste (litoral norte do Estado de Santa Catarina ao litoral sul do Estado de São Paulo)

Matriz com pixel de 30 m

Sistema cartográfico no ambiente digital: projeção Universal Transversa de Mercator, Hemisfério Sul, Zona UTM 22, latitude de origem 0° e longitude de origem 51° Oeste, *datum* SAD69.

Sistema de projeção cartográfica para impressão: idem anterior.

Resolução: 30m

Retângulo envolvente: Longitudes de 700000 a 913630 e Latitudes de 7075000 a 7330000.

Dimensões da matriz: 7121 colunas e 8500 linhas.

Matriz com pixel de 60 m

Sistema cartográfico no ambiente digital: projeção Universal Transversa de Mercator, Hemisfério Sul, Zona UTM 22, latitude de origem 0° e longitude de origem 51° Oeste, *datum* SAD69.

Sistema de projeção cartográfica para impressão: idem anterior.

Resolução: 60m

Retângulo envolvente: Longitudes de 700000 a 913630 e Latitudes de 7075000 a 7330000.

Dimensões da matriz: 3560 colunas e 4250 linhas.

Após a definição destes parâmetros, foram importadas para o banco todas as imagens de sensoriamento remoto, os mapas auxiliares e os dados alfanuméricos.

4.5.5. CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DA COBERTURA DO SOLO

Neste estudo o processo de classificação digital de imagens de sensoriamento remoto para fins de mapeamento de cobertura do solo pode ser esquematizado em cinco etapas principais de procedimentos: (1) seleção dos produtos a serem utilizados; (2) registro e pré-processamento; (3) realce; (4) seleção de algoritmos classificatórios e classificação e (5)

avaliação de desempenho da classificação. Cada uma destas etapas segue descrita em seqüência.

4.5.5.1. Seleção dos produtos de imagens

Na seleção das imagens a serem utilizadas deve-se levar em consideração o conteúdo de informação de cada sensor avaliado em relação específica aos alvos de interesse, condição esta que deriva das resoluções espaciais, radiométricas, espectrais e temporais de cada sensor.

Seguindo esta orientação, para compor a base de dados para a classificação de cobertura do solo da região litorânea do norte de Santa Catarina ao sul de São Paulo, que representa o segundo recorte territorial descrito na área de estudo, foi selecionado o conjunto de imagens de satélite descritas na tabela 4.9.

Tabela 4.9. Descrição das imagens de satélite selecionadas para o região do litoral norte de Santa Catarina ao sul de São Paulo.

Produto	Órbita/Ponto	Data de aquisição	Cobertura de nuvens	Bandas espectrais
Landsat-ETM+	220-77	02/09/2002	0 %	1-5, 7+ pancromática
Landsat-ETM+	220-78	02/09/2002	0 %	1-5, 7+ pancromática
Landsat-ETM+	219-77	25/05/2003	0 %	1-5, 7+ pancromática

Para cobrir a considerável extensão deste recorte da área de estudo foi necessário reunir conjuntos de bandas referentes a três cenas Landsat, sendo que no período compreendido entre 2000 e 2005 este foi o melhor conjunto disponível para estas cenas devido à dificuldade de obtenção de imagens livres de cobertura de nuvens.

A opção por imagens Landsat-7/ETM+ representou o melhor custo/benefício em função de seu menor custo, maior recobrimento territorial com resolução espacial razoável

(30m), além do maior número de bandas espectrais, resultando em melhor conteúdo para os objetivos do mapeamento. Os produtos Landsat-7/ETM+ apresentam uma resolução espacial de 30 m para as bandas 1 a 5 e banda 7, 60 m para a banda 6 e 15 m para a banda pancromática (0,52 μm a 0,90 μm). Das sete bandas disponíveis, são freqüentemente utilizadas nos estudos da cobertura vegetal as bandas 1 (0,45μm a 0,52 μm), 2 (0,52 μm a 0,60 μm) e 3 (0,63 μm a 0,69 μm) abrangendo a faixa do espectro visível, além das bandas 4 (0,76 μm a 0,90 μm) na faixa do infravermelho próximo e das bandas 5 (1,55 μm a 1,75 μm) e 7 (2,09 μm a 2,35 μm) na região do infravermelho médio (NASA, 2003a).

Já para o primeiro recorte descrito na área de estudo, correspondendo à faixa litorânea do leste do Brasil, a enorme extensão geográfica abrangida impossibilita a utilização de imagens Landsat. Para as aplicações envolvendo esta grande área optou-se pelo uso das bandas de campo contínuo (*tree*, *herb*, *bare*), desenvolvidas a partir das bandas terrestres 1 a 7 do sensor MODIS, conforme detalhado em (HANSEN *et al.*, 2003). As bandas MODIS utilizadas correspondem ao ano de 2001.

O MODIS ("Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer") é um sensor hiper-espectral a bordo da plataforma TERRA e possui uma resolução espacial de 250m para as bandas 1 e 2, uma resolução de 500m para as bandas de 3 a 7, e de 1000m para as bandas de 8 a 36 (NASA, 2003b). As primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situado entre 0,405 μm a 2,155 μm, de forma que as bandas 1-7 estão direcionadas para as aplicações terrestres; as bandas 8-16 para as observações oceânicas e as bandas 17-19 para as medições atmosféricas. As bandas 20-36, com exceção da banda 26 (1,360-1,390 μm), cobrem a porção termal do espectro eletromagnético (3,66 μm a 14,385μm) e podem ser utilizadas por diferentes campos das ciências naturais (NASA, 2003b).

4.5.5.2. Registro e mosaico das imagens

O tratamento inicial de imagens de sensoriamento remoto consiste no registro e restauração. O primeiro destes processamentos tem como objetivo corrigir geometricamente a imagem para um sistema de coordenadas geográficas, enquanto a restauração busca reduzir possíveis ruídos e falhas de imageamento, podendo incluir também a correção do espalhamento atmosférico.

Para a correção geométrica das imagens Landsat-7/ETM+ efetuou-se o georreferenciamento de cada cena com base em cartas topográficas de 1:50.000 do IBGE. Vários pontos de controle foram selecionados em cruzamentos de estradas, drenagens, pontes e feições que fossem identificáveis tanto na imagem quanto na carta topográfica e que possibilitavam definir um registro pontual. Procurou-se distribuir os pontos de controle o mais homogeneamente possível sobre a imagem e de modo a abranger toda a sua extensão.

As cenas 220-77 e 220-78 foram georreferenciadas para a projeção UTM, fuso 22, com o *datum* SAD-69. Em função das cartas topográficas correspondentes à cena 219-77 apresentarem-se referidas ao *datum* Córrego Alegre, esta cena teve que ser georreferenciada primeiramente a este *datum*, para em etapa posterior ser projetada em UTM (SAD-69).

O georreferenciamento foi realizado por um algoritmo que reamostrou as imagens através da transformação polinomial de segunda ordem, sendo que os erros médios de exatidão do registro (RMS) atingiram valores de 0,26 do *pixel* para a cena 220-77, de 0,13 para a cena 220-78 e de 0,23 para a cena 219-77. Tais valores de erro podem ser considerados bastante aceitáveis na etapa de interpolação, uma vez que a tolerância para a escala de 1:50.000 situa-se ao redor de 0,8 do *pixel* (CRÓSTA, 1992).

Tendo em vista que as cenas 220-77 e 220-78 foram adquiridas na mesma passagem do satélite não houve necessidade de restaurá-las e equalizá-las antes de compor o mosaico. Como estas duas cenas juntas cobrem cerca de 80% da área analisada e foram

georreferenciadas diretamente para a mesma projeção, optou-se por efetuar a mosaicagem destas cenas com a 219-77 somente após concluída a etapa de classificação.

Em relação aos produtos MODIS, as bandas de campos contínuos já foram adquiridas em mosaico corrigido radiométrica e geometricamente, sendo georreferenciadas a coordenadas geodésicas com o *datum* WGS-1984.

4.5.5.3. Realce das imagens

O principal objetivo das operações de realce é produzir uma nova imagem otimizada para a interpretação visual dos alvos de interesse, ou para a análise assistida por computador (JENSEN, 1986). Entre os tipos de realce podemos destacar os relacionados ao aumento de contraste, os filtros, as razões de bandas, as transformações de bandas como a análise por componentes principais e os índices de vegetação (SHOWENGERDT, 1983; CRÓSTA, 1993). Neste trabalho foram utilizadas as operações de realce baseadas em aumento de contraste, transformação de bandas Tasseled Cap e os índices de vegetação NDVI e GVI.

Para aumentar o contraste aplicou-se reescalonamento linear às bandas originais ETM+ para gerar imagens realçadas com as quais foram confeccionadas composições coloridas em RGB 321 (cor verdadeira) em RGB 432; 542; 543; 547; 742; 743; 753; 754 e 472 (composições em falsa-cor).

Em termos dos índices de vegetação, CROSTA (1993) e RICHARDS (1993) já destacavam serem estes as mais importantes aplicações de operações aritméticas em imagens para o realce de variáveis, sobretudo quando os alvos de interesse são componentes da vegetação.

A vegetação fotossinteticamente ativa apresenta uma assinatura espectral que pode ser dividida em três regiões espectrais (NOVO, 1992):

(1) Até 0,7μm, a reflectância é baixa (< 0,2), há um domínio da absorção da radiância incidente pelos pigmentos da planta em 0,48μm (carotenóides) e em 0,62μm (clorofila). Em 0,56μm, ocorre um pequeno acréscimo do coeficiente de reflectância, devido à percepção da cor verde da vegetação. A reflectância maior na faixa do azul (0,48μm) e do vermelho (0,62μm) deve-se à capacidade de captação de fótons nestas regiões dos pigmentos das plantas. Uma vez que apenas o componente verde da faixa do visível é menos absorvido e mais refletido, a percepção visual humana classifica as plantas como sendo verdes.

(2) De 0,7μm a 1,3μm, faixa do infravermelho, caracteriza-se uma região dominada pela alta reflectância da vegetação devido à interferência da estrutura celular.

(3) Entre 1,3μm e 2,5μm, faixa do infravermelho, a reflectância da vegetação torna-se dominada pelo conteúdo de água das folhas. Esta região apresenta dois máximos de absorção pela água (em 1,4μm e 1,95μm).

A vegetação sadia possui uma resposta característica nas regiões do espectro eletromagnético referentes ao vermelho e ao infravermelho próximo. A absorção pela clorofila na faixa do vermelho (RED) e a forte reflexão pelo tecido mesófilo ou parênquima clorofiliano na faixa do infravermelho (IR) fazem com que os valores da radiância no vermelho e no infravermelho próximo (NIR) sejam bem distintos, bem como a proporção NIR/RED seja alta. Segundo KNIPLING (1970), a resposta espectral da vegetação fotossinteticamente ativa possui uma região com uma alta absorção da radiação eletromagnética incidente, cerca de 90 %. Este fato está relacionado com a presença de pigmentos de clorofilas (a e b) e carotenóides nas folhas (fig. 4.4). Quando a vegetação está verde e sadia, observa-se uma predominância da clorofila, que possui faixas de alta absorção na região do azul (0,4 μm a 0,5 μm) e do vermelho (0,6 μm a 0,7 μm), com uma menor absorção no verde (0,5 μm a 0,6 μm). Já quando a reposta espectral de uma folha sadia é

comparada com a de uma folha senescente, pode-se visualizar diferenças entre os padrões de resposta dos alvos. As folhas senescentes apresentam uma alta absorção na região do azul e verde. Porém, mostram uma baixa absorção na região do vermelho devido à predominância de outros pigmentos, como as xantofilas e feofitinas, em função da degradação da clorofila durante o processo de envelhecimento da folha. Esses padrões podem caracterizar o status fisiológico de uma vegetação.

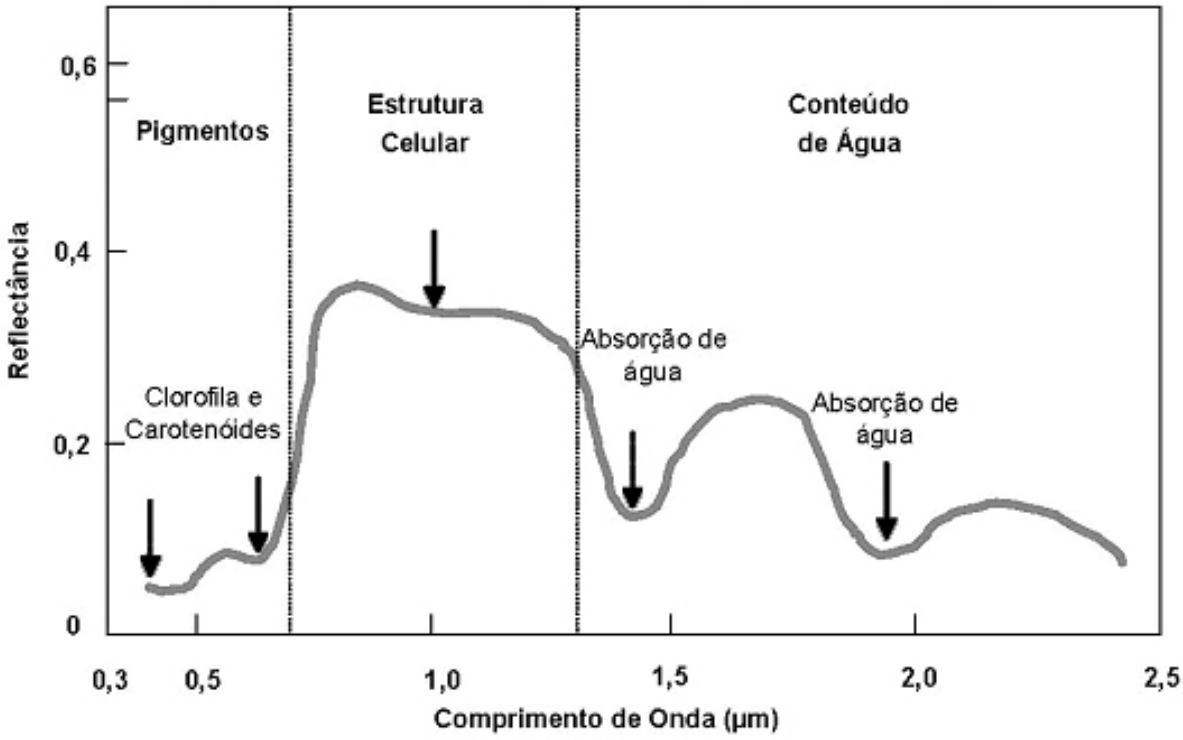


Figura 4.4. Resposta média da vegetação sadia mostrando as principais regiões do espectro que interferem no padrão de refletância das folhas. *Fonte*: Adaptado de BOWKER *et al*. (1985).

De fato, em superfícies desprovidas de cobertura vegetal, incluindo corpos d'água, áreas construídas, solo exposto e vegetação morta ou estressada, não se encontra uma resposta espectral específica e as proporções NIR/RED são menores (CAMPBELL, 1996). Além disto, o comportamento espectral das folhas depende da sua composição química e de sua estrutura interna (KNIPLING, 1970; CURRAN e KUPIEC, 1996; SHIMABUKURO *et al.*, 1998). Contudo, para passar de uma escala de reflectância foliar, medida em condições

experimentais de laboratório, para uma escala de reflectância do dossel, adquirida por sensores remotos, deve-se ainda considerar uma série de fatores que interferem nas medidas espectrais. Estas são influenciadas pelo tipo de solo, posicionamento da fonte, geometria de aquisição, atmosfera e tipo de vegetação (RONDEAUX *et al*., 1996; DANSON, 1998; GASTELLU-ETCHEGORRY *et al*., 1999; GAO *et al*., 2000), sendo que a variação da reflectância da cobertura vegetal em diferentes bandas de sensores remotos depende sobretudo da quantidade de folhas e da arquitetura do dossel (SHIMABUKURO *et al.*, 1998).

Estas características do comportamento espectral da vegetação, sobretudo o forte contraste entre a quantidade de energia refletida nas regiões do vermelho e do infravermelho-próximo, tem sido o foco de uma grande variedade de tentativas de desenvolver índices quantitativos de condição da vegetação através do uso de imagens de sensores remotos. Tais índices de vegetação combinam a reflectância da vegetação nas faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, constituindo modelos projetados para fornecer uma avaliação quantitativa da biomassa da vegetação verde com base nos valores de reflectância (THIAM e EASTMAN, 2003). Os índices de vegetação podem ser divididos em dois grupos principais: os índices de razão e os índices ortogonais, perpendiculares ou baseados em distância. O primeiro grupo toma como base o contraste entre a resposta da vegetação na banda do vermelho (VER) e do infravermelho próximo (NIR), incluindo índices como o Índice de Vegetação Proporcional (RVI) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Já o segundo grupo trabalha com o padrão de respostas nestas duas bandas e faz uso do conceito de linha do solo, com o objetivo de calcular a distância entre a linha do solo e a vegetação, incluindo índices de vegetação ajustados ao solo tais como o SAVI, TSAVI e MSAVI (HUETE, 1988; BARET e GUYOT, 1991; QI *et al*., 1994; THIAM e EASTMAN, 2003; OLIVEIRA *et al*., 2007).

Dentre todos os índices de vegetação, o mais conhecido e utilizado é o *IVDN*, *Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada*, mais conhecido como *NDVI* ("*Normalized Difference Vegetation Index*"). Criado por ROUSE *et al.* (1974), o NDVI pode ser obtido através de imagens de sensores remotos aéreos e orbitais, pela razão entre a diferença e a soma da reflectância na região do infravermelho próximo (NIR) e da reflectância na região do vermelho (RED), segundo a equação:

$$\boldsymbol{NDVI} = NIR - RED / NIR + RED$$

Já a transformação *Tasseled Cap* situa-se no grupo dos índices ortogonais, tendo sido bastante utilizada para estudos de desenvolvimento de cultivos agrícolas e previsão de safras. A transformação *Tasseled Cap* foi criada por KAUTH e THOMAS (1976) para transformar as quatro bandas do sensor Landsat-MSS em um novo espaço ortogonal de quatro dimensões, com base em técnicas de ortogonalização seqüencial de Gram-Schmidt. Dos quatro novos eixos ("brightness", "greeness", "yellowness" e "non such") as duas primeiras componentes representam entre 95 e 98% da informação existente nas bandas ortogonais (JENSEN, 1996; CCRS, 200x). Enquanto a componente *brilho* ("brightness") reflete o plano dos solos, a componente *verdor* ("greeness") reflete o contraste existente entre as bandas do visível e do infravermelho, estando, portanto, relacionada à vegetação.

Posteriormente CRIST e CICONE (1984) adaptaram esta transformação para os dados do sensor Landsat-TM, que devido ao acréscimo das bandas do infravermelho médio, permitiria obter uma componente adicional, denominada *umidade* ("wetnesss" ou "moistness"), que fornece informação sobre a umidade existente nos solos e na vegetação. O algoritmo desenvolvido com os coeficientes gerados por CRIST e CICONE (1984) realiza a transformação nas seis bandas do TM para obter três novos canais: *verdor* ("greenness"), *brilho* ("brightness") e *umidade* ("moistness"). A banda *verdor* ou "greeness" constitui um

índice de vegetação conhecido como GVI ("Green Vegetation Index"), que se refere à cobertura de vegetação verde ou biomassa acima do solo.

Baseados na tranformação Tasseled Cap para o sensor TM, HUANG *et al*. (2002) modificaram as equações para adaptar a operação aos dados do sensor Landsat-7/ETM+. Derivado das adaptações de HUANG *et al*. (2002), o algoritmo empregado neste estudo para produzir as três bandas da transformação a partir das cenas ETM+ utilizou as seguintes equações:

ETMPlus Bright *= (ETMPlus1*0.3561)+(ETMPlus2*0.3972)+(ETMPlus3*0.3904) +(ETMPlus4*0.6966)+(ETMPlus5*0.2286)+(ETMPlus7*0.1596)*

ETMPlus Green *= (ETMPlus1*(-0.3344))+(ETMPlus2*(-0.3544))+(ETMPlus3* (-0.4556))+(ETMPlus4*0.6966)+(ETMPlus5*(-0.0242))+(ETMPlus7*(-0.2630))*

ETMPlus Moist *= (ETMPlus1*0.2626)+(ETMPlus2*0.2141)+(ETMPlus3*0.0926) +(ETMPlus4*0.0656)+(ETMPlus5*(-0.7629))+(ETMPlus7*(-0.5388))*

Após geradas as imagens realçadas pela Tasseled Cap, foi também confeccionada uma composição colorida RGB-VBU (verdor, brilho e umidade). Tanto esta quanto as demais composições coloridas produzidas nesta etapa foram utilizadas na fase de classificação supervisionada para facilitar a obtenção das amostras das classes.

4.5.5.4. Seleção de algoritmos classificatórios e classificação digital de imagens

Tradicionalmente o processo de classificação de imagens foi desenvolvido pela interpretação visual de características do alvo e delineamento manual de seus limites de

extensão. Entretanto, com o advento das imagens digitais e do aumento da capacidade de processamento computacional, a classificação vem sendo cada vez mais direcionada para os procedimentos auxiliados por computador. Ainda que a percepção visual humana continue a representar um conjunto de capacidades altamente qualificado para o processo de classificação, a velocidade e consistência dos procedimentos digitais apresentam atrativos inquestionáveis. Como conseqüência, a tendência atual das iniciativas de classificação faz uso de procedimentos digitais de classificação guiados por interpretação humana (EASTMAN, 2003).

De uma maneira geral os procedimentos utilizados para a classificação possuem dois estágios, sendo que o primeiro constitui o reconhecimento de categorias de objetos no mundo real e o segundo consiste na rotulagem das entidades que se pretende classificar (MATHER, 1999). No caso de imagens digitais, estas entidades geralmente são representadas por *pixels*, já que espacialmente os dados de sensoriamento remoto formam uma *matriz raster* em que cada célula, o chamado *pixel* ou elemento de cena, apresenta um determinado *número digital* ("digital number" - DN), que pode ser relacionado a características biogeofísicas do terreno ao qual aquela célula corresponde.

Dependendo do processo de classificação, o estágio de rotulamento pode empregar classificadores *pixel* a *pixel* ou por região. Os primeiros utilizam a informação espectral de cada *pixel* isoladamente, para em outra etapa encontrar regiões homogêneas. Estes classificadores podem ainda ser separados em métodos estatísticos e determinísticos. Os classificadores por regiões utilizam a informação espectral de cada *pixel*, bem como a informação espacial que envolve a relação entre os *pixels* e seus vizinhos. Estes classificadores procuram simular o comportamento de um foto-intérprete, que reconhece áreas homogêneas com base nas propriedades espectrais e espaciais da imagem (INPE, 2003).

Na classificação automatizada o computador realiza a tarefa de analisar atributos numéricos de um *pixel* e este processo pode ser supervisionado ou não-supervisionado. Na abordagem não-supervisionada, o usuário não necessita de um conhecimento *a priori* da área que será classificada, nem tampouco das classes que estão presentes na região. O classificador presente no aplicativo é utilizado para reconhecer padrões distintos de reflectância na imagem, sobre a assunção de que estes representam as principais classes de cobertura ocorrentes na região analisada. O analista então determina *a posteriori* a identidade destas classes através, por exemplo, de verificação de verdade terrestre (EASTMAN, 2003).

A abordagem de classificação supervisionada é realizada quando o usuário tem conhecimento prévio da área de estudo e com esta base cognitiva pode selecionar amostras das classes de interesse, que são descritas por parâmetros estatísticos que as identificam. A partir destas *áreas de treinamento* coletadas na imagem são efetuados procedimentos de treinamento, nos quais os parâmetros descritos anteriormente auxiliam na decisão de classificação da pertinência de um determinado *pixel* ou região a uma das classes alvo (MATHER, 1999).

4.5.5.5. Algoritmos classificatórios

Os algoritmos de classificação, também conhecidos como regras de decisão, são métodos utilizados para comparar um *pixel* cuja pertinência a uma classe de interesse é desconhecida com o conjunto de *pixels* conhecidos das áreas de treinamento. Neste estudo foram testadas três abordagens de classificação: o classificador de Fisher, o classificador de Máxima Verossimilhança e as Redes Neurais Artificiais.

4.5.5.5.1. O classificador de Fisher

O classificador de Fisher realiza uma análise linear discriminante sobre os dados das áreas de treinamento com o objetivo de formar um conjunto de funções lineares que expressam o grau de suporte para a designação de cada classe envolvida. A pertinência de cada *pixel* corresponde à classe que recebeu o mais alto suporte de designação depois da avaliação de todas as funções. A forma de tais funções é similar a aquela apresentada por uma equação de regressão multivariada linear, onde as variáveis independentes são as bandas de imagens e a variável dependente é a medida de suporte. De fato, as equações são calculadas de modo a maximizar a variância entre classes e minimizar a variância dentro das classes. O número de equações será igual ao número de bandas utilizadas na classificação, cada uma das quais descrevendo um plano de suporte, sendo que a intersecção destes planos forma os limites entre as classes no hiperespaço classificatório.

FISHER (1936) foi o primeiro a sugerir que uma classificação deveria ser baseada em uma combinação linear de variáveis discriminantes, propondo a utilização de uma combinação linear que maximize diferenças entre as classes enquanto minimiza variação intraclasse. As funções classificatórias neste algoritmo de Fisher seguem a sua proposição, sendo que cada função permite computar escores de classificação para cada *pixel* em relação a cada classe, de acordo com a seguinte fórmula:

$$mS_i = c_i + \sum (w_{i,j} x_j) j = 1 \qquad \text{, onde}$$

o subscrito i denota a classe respectiva;

o subscrito j, j=1,2,..., m denota as m bandas;

c_i é uma constante para a i-éssima classe;

$w_{i,j}$ é o peso para a *j*-éssima banda na computação do escore de classificação para a *i*-éssima classe;

x_j é o valor observado para o caso respectivo para a *j*-éssima classe;

S_i é o escore para a classe *i*.

A classe com o escore mais alto é assinalada ao *pixel* como seu rótulo de classe.

Além disto, $w_{i,j}$ e c_i são calculados pela seguinte fórmula:

$$w_{i,j} = (N - P) \sum_{k=1}^{p} (a_{i,k}\, x_{k,i})$$

$$c_i = -0,5 \cdot \sum_{k=1}^{p} (w_{i,k}\, x_{k.i}) \quad \text{, onde}$$

N é o número total de *pixels* em todas as classes;

P é o número de classes;

$a_{i,k}$ é um elemento do inverso da soma da matriz de variância/covariância de cada classe;

$w_{i,k}$ é o valor observado na *i*-éssima banda para a *k*-éssima classe.

Maiores explicações sobre análises discriminantes podem ser encontradas em KLECKA (1980).

4.5.5.5.2. O classificador de Máxima Verossimilhança

O classificador de Máxima Verossimilhança ou Máxima Probabilidade está baseado na abordagem Bayesiana de probabilidade. A partir da informação obtida de um conjunto de áreas de treinamento, este algoritmo utiliza a média e a variância/covariância de suas assinaturas espectrais para estimar a probabilidade *a posteriori* de que um *pixel* pertença a cada uma das classes envolvidas. Incorporando informação sobre a covariância entre bandas,

bem como sobre sua variância inerente, este classificador produz o que pode ser conceitualizado como uma zona elíptica de caracterização da assinatura espectral (fig. 4.5).

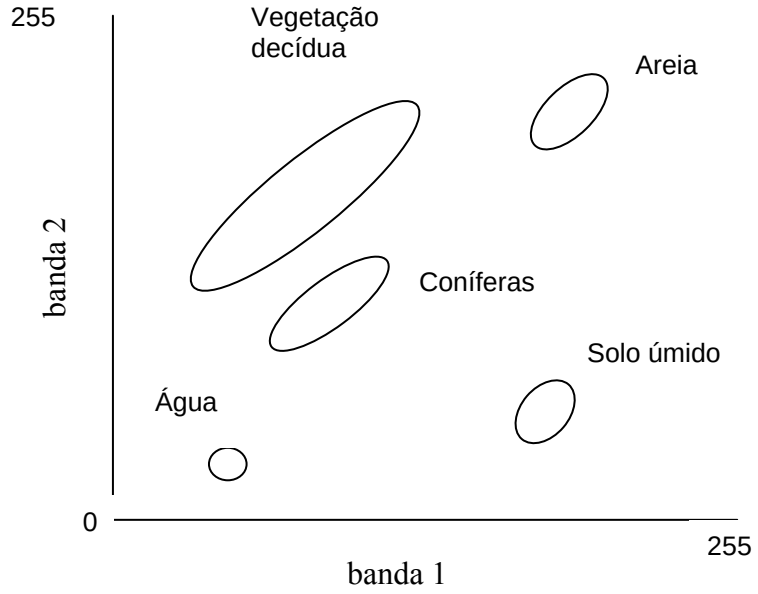


Figura 4.5. Representação esquemática das zonas elípticas de caracterização das assinaturas espectrais das categorias no classificador de Máxima Verossimilhança. *Fonte*: Adaptado de EASTMAN (2003).

Na realidade o algoritmo calcula a probabilidade posterior de pertinência a cada classe, onde a probabilidade é mais alta na posição média da classe e decresce em um padrão elíptico à medida que se afasta da média. Os procedimentos empregados foram derivados das fórmulas de RICHARDS (1986).

4.5.5.5.3. Redes Neurais Artificiais (RNAs)

As *Redes Neurais Artificiais (RNAs)* consistem em sistemas computacionais que simulam a maneira como o sistema nervoso humano processa a solução de problemas. As RNAs são definidas como sistemas de processamento em paralelo, distribuídos, compostos

por unidades de processamento simples (*nodos*, *nós*, ou *neurônios*) e que computam determinadas funções matemáticas, normalmente não-lineares (BRAGA *et al*., 1998; HAYKIN, 2001). Tais unidades são dispostas em uma ou mais *camadas* interligadas por um grande número de *conexões*, geralmente unidirecionais. Na maioria dos modelos estas conexões estão associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida em cada neurônio da rede (BRAGA *et al*., 1998).

Um modelo de rede neural simplificado para o entendimento de como esta ferramenta processa as informações pode ser exemplificado através da figura 4.6.

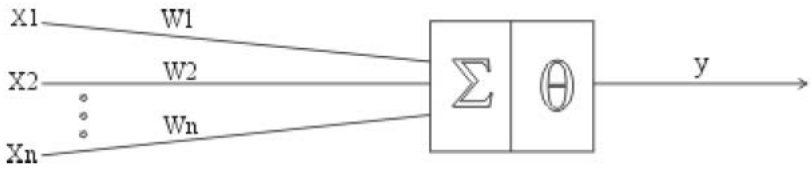


Figura 4.6. Exemplo de uma arquitetura neural simplificada.

Na figura 4.6, $x_1, x_2 \ldots x_n$ denotam os vetores de entrada e $w_1, w_2 \ldots w_n$ representam os pesos associados a estes vetores de entradas. Estes pesos podem ser positivos ou negativos, dependendo das sinapses correspondentes serem excitadoras ou inibidoras, ou seja, se as ligações responsáveis pela transmissão da informação repassam ou não esta informação. O termo y denota um terminal de saída e Σ representa o somatório ponderado dos impulsos recebidos, onde esta soma define se o neurônio irá ou não repassar a informação, o que dependerá do seu limiar de excitação (θ), de modo que sendo $\Sigma \geq \theta$ o neurônio repassa a informação.

A ativação do neurônio é obtida através da aplicação de uma *função de ativação*, que habilita ou não a saída, dependendo do valor da soma ponderada das suas entradas. A função

de ativação é dada pela função de limiar descrita na seguinte equação (BRAGA *et al*., 1998; HAYKIN, 2001):

$$\sum_{i=1}^{n} x_i w_i \geq \theta \qquad \text{, onde}$$

n é o número de entradas do neurônio;

w_i é o peso associado à entrada x_i e

θ é o limiar do neurônio.

Em RNAs, o procedimento usual na solução de problemas passa inicialmente por uma fase de *aprendizagem*, onde um conjunto de exemplos é apresentado para a rede, a qual extrai automaticamente as características necessárias para representar a informação fornecida (BRAGA *et al*., 1998). Tais características são utilizadas posteriormente para efetuar predição ou generalização. A capacidade de *aprender* através de exemplos e de *generalizar* a informação aprendida, é sem dúvida, o atrativo principal da solução de problemas através de RNAs. Estas estruturas de aprendizagem apresentam capacidades interessantes, tais como extrair informações não-apresentadas de forma explícita através de exemplos; atuar como mapeadores universais de funções multivariáveis, com custo computacional que cresce apenas linearmente com o número de variáveis, além de serem capazes de auto-organização e processamento temporal. Devido a estas características, as RNAs configuram-se com uma ferramenta computacional extremamente poderosa e atrativa para a solução de problemas complexos.

Parte da discussão sobre RNAs gira em torno dos métodos de aprendizado para que os neurônios possam ser capazes de executar uma determinada função. A plasticidade da aprendizagem de redes neurais é conseguida através da variação dos pesos de entrada dos

neurônios. O procedimento utilizado para realizar o processo de aprendizagem é chamado de *algoritmo de aprendizagem*, cuja função é modificar os pesos sinápticos da rede de uma forma ordenada. Estes algoritmos diferenciam-se pela maneira através da qual o ajuste dos pesos é feito. A aprendizagem é o processo pelo qual os parâmetros de uma rede neural são ajustados através de uma forma continuada de estímulo pelo ambiente no qual a rede está operando, sendo o tipo específico de aprendizagem definida pela maneira particular como ocorrem os ajustes realizados nos parâmetros (BRAGA *et al*., 1998; HAYKIN, 2001). Ao final do processo, os pesos das conexões entre as unidades de processamento guardam o conhecimento que a rede adquiriu do ambiente em que está operando.

Diversos métodos para treinamento de redes foram desenvolvidos, que podem ser agrupados em duas abordagens principais: o aprendizado supervisionado e o não-supervisionado (BRAGA *et al.*, 1998; HAYKIN, 2001). O primeiro tipo é assim denominado em virtude de que a entrada e saída desejadas são fornecidas pelo usuário. O objetivo é ajustar os parâmetros da rede, de forma a encontrar um mapeamento entre os pares de entrada e saída fornecidos. A cada padrão de entrada submetido à rede, compara-se a resposta desejada com a resposta calculada, ajustando-se os pesos das conexões para minimizar o erro. A soma dos erros quadráticos de todas as saídas é utilizada como medida de desempenho da rede e também como função de custo a ser minimizada pelo algoritmo de treinamento.

A maneira pela qual os neurônios de uma rede estão estruturados está intimamente ligada com o algoritmo de aprendizagem usado para treinar a rede. A arquitetura de uma RNA restringe o tipo de problema que pode ser tratado pela rede, de modo que redes com uma camada única, por exemplo, conseguem apenas resolver problemas linearmente separáveis, enquanto que redes recorrentes (que têm pelo menos um laço de realimentação) são mais apropriadas para resolver problemas que envolvem processamento temporal. Fazem parte da definição da arquitetura os seguintes parâmetros: (a) número de camadas da rede (camada

única ou camadas múltiplas); (b) número de nós em cada camada; (c) tipo de conexão entre os nós (cíclicas ou acíclicas); e (d) topologia da rede. É importante a definição de algoritmos que otimizem não somente os pesos para uma dada arquitetura, mas também a própria arquitetura.

4.5.5.5.4. RNAs do tipo perceptron multi-camadas com retropropagação

O algoritmo de RNA para aplicações de sensoriamento remoto procura simular como o sistema nervoso humano processa problemas envolvendo dados espaciais. Quando aplicado no contexto de uma classificação supervisionada, estes algoritmos muitas vezes são mais eficientes e requerem menos dados de treinamentos quando comparados a classificadores tradicionais (ATKINSON *et al*., 1997; CHAN *et al*., 2001). Neste contexto RNAs podem ser concebidas como uma função matemática complexa não-linear que converte dados de entrada (dados de imageamento remoto) em um resultado desejado (uma classificação de cobertura do solo). Uma das vantagens que estes modelos apresentam é o fato de não haver requisitos em termos de distribuição dos dados que podem ser analisados, ou seja, o algoritmo não assume modelos subjacentes sobre a distribuição estatística das variáveis (BROWN *et al*., 1998).

O algoritmo de aprendizagem do tipo perceptron multi-camadas com retropropagação ("back-propagation" - BP) é um dos modelos de redes neurais mais amplamente utilizados. Pertencente a este grupo de RNAs, o classificador Back Propagation utilizado neste estudo está incluído no módulo NEURALNET do pacote Idrisi Kilimanjaro, sendo que a explanação abaixo fornecida sobre a sua operação está baseada na documentação do sofware na versão 14.02.

Uma rede de retropropagação típica contém uma camada de entrada, uma camada de saída e uma ou mais camadas escondidas. Na figura 4.7 cada camada contém nós ou neurônios e está conectada por linhas de cores diferentes, indicando pesos conectores de intensidade desigual. A função dos neurônios da camada escondida é equivalente a linhas que

podem discriminar pontos dentro de vários grupos em um espaço de características. Pesquisas indicam que uma rede neural com retropropagação de três camadas pode aproximar qualquer função polinomial. Contudo, o processamento completo de uma rede neural é uma operação do tipo “caixa-preta”.

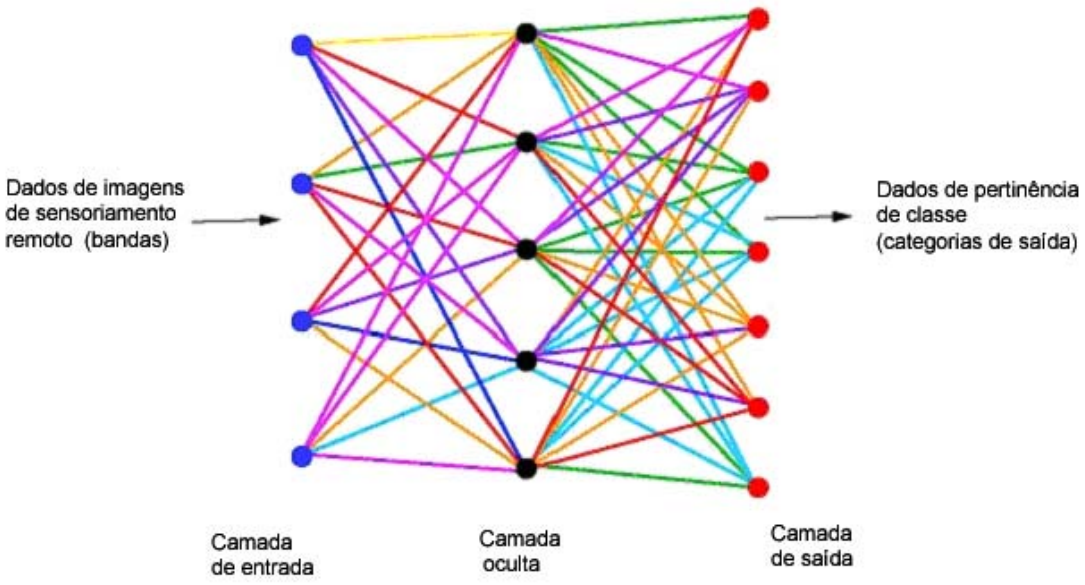


Figura 4.7. Estrutura de uma rede neural de retropropagação com três camadas.

A retropropagação envolve dois passos principais para realizar a modificação de seu estado neural: a propagação para diante e a propagação para trás. Durante o processo de treinamento, cada amostra é inserida dentro da camada de entrada e cada neurônio receptor soma os sinais ponderados vindos de todos os neurônios aos quais ele está conectado na camada precedente. Formalmente, a entrada que um único neurônio recebe é ponderada de acordo com a fórmula:

$$net_j = \sum_{i=1}^{m} w_{ij} o_i \quad \text{, onde}$$

w_{ij} representa o peso entre o neurônio *i* e o neurônio *j* e o_i é o resultado do neurônio *i*.

O resultado de um dado neurônio *j* é então computado a partir de:

$$o_i = f(net_j)$$

Usualmente esta é uma função sigmoidal não-linear que é aplicada à soma ponderada das entradas antes que o sinal passe para a próxima camada. Uma vez que o passo para diante é concluído, as atividades dos neurônios de entrada são comparadas com suas atividades esperadas. A título de exemplo, se uma rede possue seis neurônios de saída, sendo que cada neurônio na camada de saída está associado a uma classe, um padrão de resultado esperado poderia ser esta seqüência (1,0,0,0,0,0). Quando um padrão é apresentado à rede, cada neurônio de saída vai gerar um valor que indica a similaridade entre o padrão de entrada e a classe correspondente. Exceto em circunstâncias muito pouco usuais, a saida real irá diferir do resultado desejado, sendo que a diferença está associada a um erro na rede. O erro é então propagado para trás com os pesos das conexões relevantes sendo corrigidos via uma relação conhecida como regra delta:

$$\Delta w_{ji(t+1)} = \eta \delta_{ji} o_i + \alpha \Delta w_{ji(t)} \quad \text{, onde}$$

η é a taxa de aprendizado, α é o fator momento e δ é o erro computado.

Os passos para diante e para trás continuam até que a rede tenha "aprendido" as características de todas as classes. A proposta do treinamento da rede é obter os pesos apropriados tanto para as conexões entre a camada de entrada e a oculta, quanto para as conexões entre a camada oculta e a de saída, que corresponde à classificação dos *pixels* desconhecidos. O padrão de entrada é classificado dentro da classe que está associada ao neurônio com o mais alto nível de ativação.

Para realizar o treinamento de redes, existem alguns parâmetros a serem manipulados que constituem controles sobre a amostragem, a arquitetura da rede, o processo de aprendizado, os limiares de conclusão do treinamento e a monitoração de sobretreinamento.

Os controles de amostragem definem o número de *pixels* de treinamento e de teste por classe, enquanto os parâmetros de arquitetura são o número de neurônios nas camadas de entrada, de saída e na camada oculta.

Já os controles relativos à aprendizagem regulam a velocidade e qualidade do treinamento e estão representadas pela constante *a* da função sigmóide; pela taxa de aprendizado e pelo fator momento.

Para determinar o momento de interromper o processo de treinamento são definidos os controles de limiar do RMS aceitável, do número máximo de iterações e da acurácia aceitável.

Por fim, a monitoração de sobretreinameto representa um controle de acompanhamento baseado na verificação da consistência entre as tendências das curvas de erro de treino e de teste. Quando uma inconsistência ocorre esta situação pode indicar que houve sobretreinamento, permitindo então rejeitar as redes que apresentaram esta condição.

A etapa de treinamento das redes é crucial para uma boa aplicação de RNAs, sendo que este processo representa um grande custo em termos do tempo necessário para treinar uma rede eficaz para o reconhecimento dos padrões desejados.

No caso do presente estudo os procedimentos de treinamento envolveram variar os parâmetros de controle e monitorar a ocorrência de sobretreinamento, para então selecionar a melhor rede treinada com base na acurácia final atingida no treinamento.

4.5.5.6. Avaliação de desempenho dos algoritmos classificatórios

Os três algoritmos acima descritos foram empregados na classificação de cobertura do solo da área litorânea do norte de Santa Catarina ao sul de São Paulo, com vistas a selecionar aquele com melhor desempenho para efetuar a classificação geradora do produto final.

A avaliação de desempenho foi realizada a partir da comparação entre as matrizes de erro e os índices Kappa. A matriz de erro ou matriz de confusão compara duas imagens com o objetivo de avaliar a acurácia da classificação, sendo particularmente usada na etapa de pós-classificação para avaliar mapeamentos de cobertura do solo derivados de sensoriamento remoto. Neste procedimento, realiza-se uma tabulação cruzada entre uma imagem contendo o mapa de cobertura do solo interpretado e outra que contém o resultado de investigação de verdade terrestre ou de pontos obtidos em materiais auxiliares, tais como produtos de maior resolução espacial (CHUVIECO, 1990). A partir da matriz de confusão pode ser desenvolvida uma série de medidas estatísticas que concluem o processo de validação, sendo descritas por vários autores (*e.g*. CHUVIECO, 1990; CONGALTON; 1991; LILLESAND e KIEFER, 1994). Derivados desta matriz de cruzamento são obtidos os erros de omissão e comissão, o erro geral e o *Índice de Concordância Kappa* ("Kappa Index of Agreement"-KIA), para cada classe e para todas as classes reunidas.

O coeficiente *Kappa* (*K*) expressa a redução proporcional no erro gerado na classificação, comparado com o erro de uma classificação aleatória, ou seja, representa o quanto a classificação efetuada foi melhor do que uma atribuição ao acaso de *pixels* às classes. O coeficiente *K* é uma medida estatística que resume as informações da matriz de

confusão e serve como indicador da extensão em que os percentuais corretos da matriz de erros são devidos a concordâncias "reais" ou concordâncias "ao acaso" (LILLESAND e KIEFER, 1994). Um valor positivo de *K* indica que o valor observado da concordância é maior do que da concordância aleatória. Assim, à medida que a concordância verdadeira aproxima-se de 1 e a concordância ao acaso aproxima-se de 0, então *K* aproxima-se de 1, indicando uma situação ideal. A fórmula para cálculo de *K* pode ser encontrada em JENSEN (1996) e é representada por:

$$K = \frac{N\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r} x_{i+}\, x_{+i}}{N^2 \sum_{i=1}^{r} x_{i+}\, x_{+i}} \quad \text{onde,}$$

K é o coeficiente Kappa;

x_{ii} representa os elementos da diagonal da matriz de confusão, a concordância observada;

x_{i+} é a soma da linha i da matriz de confusão;

x_{+i} é a soma da coluna i da matriz de confusão;

$x_{i+}\, x_{i+}$ representa a concordância observada esperada e

N é o total de elementos observados.

O coeficiente Kappa tem seus valores distribuídos entre 0 e 1, onde o valor 1 representa a concordância máxima, sendo que quando multiplicado por 100 indica a porcentagem da medida de exatidão da classificação. De acordo com LANDIS e KOCH (1977), a avaliação a partir do coeficiente Kappa pode ser realizada com base na tabela 4.10.

Tabela 4.10. Classificação dos valores do coeficiente Kappa.

KAPPA	EXATIDÃO
<0	Péssima
0 – 0.2	Ruim
> 0.2 – 0.4	Razoável
> 0.4 – 0.6	Moderada a Boa
> 0.6 – 0.8	Muito Boa
> 0.8 – 1.0	Excelente

Fonte: Adaptado de LANDIS e KOCH (1977).

Adicionalmente, para avaliar as diferenças de performance entre os algoritmos classificadores analisados foi também utilizado o teste de McNemar (McNEMAR, 1947). Este teste pode ser aplicado para dados dicotômicos representados em uma tabela 2x2 (tab. 4.11), cujos dados derivam da matriz de confusão gerada para cada modelo. A medida calculada por este teste, $(b-c)^2 / (b+c)$, tem um valor aproximado ao do χ^2 com grau de liberdade igual a um, no caso do valor de b+c ser maior do que 10, caso seja menor, um teste binomial deve ser aplicado (ZAR, 1999). O uso do teste de McNemar tem sido recomendado quando se compara a performance de técnicas de modelagem alternativas (DIETTERICH, 1998; de LEEUW *et al*., 2006).

Tabela 4.11. Tabulação cruzada do número de pixels correta e incorretamente classificados por dois algoritmos classificadores, com base nas duas matrizes de confusão geradas pelo método 1 e 2 respectivamente.

		modelo 2	
modelo 1		correto	incorreto
	correto	*a*	*b*
	incorreto	*c*	*d*

Em termos de conjuntos de dados de treinamento e teste, nesta etapa de seleção de algoritmos as classificações foram realizadas utilizando como variáveis de entrada apenas as seis bandas Landsat-7/ETM+ originais, ou seja, as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

As amostras de treinamento foram construídas para as 23 classes de cobertura do solo definidas na legenda final (tab. 4.8), com base nas 32 classes singulares construídas na etapa anterior dentro do sistema de classificação LCCS (tab. 4.7).

Para otimizar a extração de amostras das áreas de treinamento utilizou-se o apoio visual das várias composições coloridas confeccionadas com as imagens realçadas, além de composições de fusão com a imagem pancromática para melhorar a resolução espacial, já que esta 8ª banda do Lansat-7/ETM+ possui resolução de 15m.

A avaliação de desempenho das classificações tomou como base um mapa de referência com pontos rotulados dentro das 23 classes de cobertura do solo definidas, os quais foram oriundos sobretudo de inventários de campo, mas também incluíram fotointerpretação sobre imagens de maior resolução espacial e em menor grau, informação bibliográfica.

Os pontos de verdade terrestre obtidos em inventários de campo incluíram percursos aéreos em reconhecimento de sobrevôo baixo; percursos terrestres efetuados de carro ao longo de estradas existentes; percursos de barco ao longo de cursos d'água; além de inventários de caracterização expedita da fisionomia e estrutura da vegetação realizados em áreas fora do alcance de vias de comunicação. Todos estes pontos foram submetidos a uma classificação de tipologia segundo os sistemas adotados, sendo sua localização obtida através de GPS.

Também foram obtidos pontos adicionais que puderam ser georreferenciados a partir de fotointerpretação de imagens de maior resolução espacial, tais como fotos aéreas em escala de 1:25.000 e de imagens IKONOS de 2002/2003, que em composição colorida das bandas do visível RGB321 apresentam uma resolução espacial de 4m.

Consideramos também alguns pontos obtidos na bibliografia, mas esta situação ocorreu apenas quando pode ser coletada informação confiável sobre a classe de cobertura e a posição de georreferência.

4.5.5.7. Classificação final

4.5.5.7.1. Recorte geográfico: região litorânea do norte de Santa Catarina ao sul de São Paulo

Nesta etapa realizou-se a classificação digital definitiva para produzir o mapeamento de cobertura do solo da região litorânea do norte de SC ao sul de SP, empregando o algoritmo classificatório que apresentou o melhor desempenho na fase anterior.

As amostras de treinamento, a imagem de referência e o processo para avaliação de desempenho seguiram sendo aqueles descritos anteriormente. Já as variáveis de entrada incluíram, além das bandas originais 1,2,3,4,5 e 7, também as imagens de índices de vegetação NDVI e as imagens da transformação Tasseled Cap (bandas verdor, brilho e umidade).

Após a classificação, com vistas a melhorar o aspecto da imagem classificada e reduzir o efeito "salpicado" (*"salt and pepper"*), o mapa sofreu varredura com emprego de um filtro de moda em kernell de 3 x 3 *pixels*.

Na etapa final de pós-processamento aplicou-se ao mapa classificado uma máscara para delimitar as áreas quaternárias de interesse, que foi construída com base no mapas geológicos de ANGULO (1992; 2004), ANGULO e SOUZA (2004) e SUGUIO (1978).

4.5.5.7.2. Recorte geográfico: faixa litorânea do Brasil oriental

Empregando o mesmo algoritmo selecionado, procedeu-se uma classificação para o primeiro recorte descrito na área de estudo, que abrange toda a faixa litorânea do leste do Brasil.

Esta classificação foi efetuada tomando com variáveis de entrada as bandas MODIS de campo contínuo (tree, herb, bare).

As amostras de treinamento foram definidas para as seguintes 3 classes de cobertura do solo:

1. *Cobertura arbórea*
2. *Cobertura não-arbórea e/ou superfície terrestre não-vegetada*
3. *Superfície líquida*

Para gerar as amostras de treinamento, primeiramente efetuou-se uma reclassificação do mapeamento final obtido sobre as imagens Landsat-7/ETM+, de forma a corresponder às três classes acima definidas.

No passo seguinte este mapa reclassificado foi reamostrado por algoritmo de agregação pelo vizinho mais próximo, com vistas a assumir a resolução de 500m e a georreferência em coordenadas geodésicas com *datum* WGS-84, para que pudesse ser compatível com as características originais das bandas MODIS.

Após estes processamentos, as áreas representadas por estas três categorias no mapa reprojetado foram utilizadas como amostras de treinamento na classificação executada sobre o recorte da área de estudo abrangendo a faixa litorânea do Brasil oriental.

A avaliação de desempenho desta classificação seguiu os mesmos procedimentos descritos anteriormente, sendo que a imagem referência consistiu de pontos obtidos segundo

inventário realizado sobre imagens de sensores com maior resolução espacial, no caso Lansat-7/ETM+ com resolução de 30m e IKONOS com resolução de 4m.

Para realizar este inventário, foi gerada uma rede de pontos em amostragem estratificada aleatória, os quais foram plotados sobre composição colorida das bandas do visível em imagens Landsat-7/ETM+ e IKONOS, sendo então rotulados segundo as três categorias pré-definidas. Estes procedimentos foram realizados sobre imagens de 2002/2003 disponíveis através do Google-Earth.

Também nesta etapa final de pós-processamento o mapa classificado recebeu a aplicação de uma máscara de delimitação das áreas quaternárias costeiras, a qual foi elaborada com base no mapas geológicos de 1:1.000.000 da CPRM.

4.5.6. CRIAÇÃO DOS DEMAIS PLANOS DE INFORMAÇÃO

Para realizar as análises desenvolvidas neste capítulo, além dos planos de informação derivados das classificações de sensoriamento remoto, foram criados diversos planos de informação adicionais cujos procedimentos de elaboração serão abaixo descritos.

4.5.6.1. Mapa geológico

Para a faixa litorânea do leste do Brasil foi construído um mapa geológico com base nas folhas SI-22; SH-22; SG-22; SG-23; SF-23; SF-24; SE-24; SD-24; SC-24; SC-25; SB-24; SB-25; AS-23 e SA-24 da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, publicada pela CPRM (2004). O mapa final apresentou 21 classes de coberturas geológicas para o quaternário costeiro do leste brasileiro.

4.5.6.2. Mapa de grupos de vegetação

Para a faixa litorânea do Brasil oriental foi elaborado um mapeamento de grupos de vegetação com base nos mapas de vegetação publicados nos volumes 21; 23; 24; 30; 32; 33 e 34 do Projeto RADAM Brasil. Como as legendas dos distintos volumes apresentam diferenças, efetuou-se uma padronização para seguir a concepção atual do Sistema Fitogeográfico Brasileiro do IBGE. O mapa final compreendeu 19 classes de cobertura de vegetação para o quaternário do litoral oriental brasileiro.

4.5.6.3. Modelo digital de elevação e mapa de declividade

No recorte geográfico da região litorânea entre o norte de SC e sul de SP o modelo digital de elevação foi compilado através de dados SRTM. A Missão do ônibus espacial de topografia por radar ("Shuttle Radar Topography Mission"- SRTM) é um projeto internacional liderado pela NASA e pela Agência Nacional de Inteligência Geoespacial dos Estados Unidos. Executada pelo ônibus espacial Endeavour durante 11 dias em fevereiro de 2000, seu objetivo foi obter a mais completa base de dados topográfica digital de alta resolução da Terra. Os dados foram processados no Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA e são distribuídos através do United States Geological Survey com a resolução de 3", ou cerca de 90m (VALERIANO, 2004). Os modelos de elevação SRTM utilizados seguiram a metodologia de VALERIANO (2004) o que permite correções e melhoramentos compatíveis com produtos de resolução de 1", ou cerca de 30m (VALERIANO, 2005). O modelo digital de elevação em resolução de 30m foi construído com base também em aerofotografias em escala de 1:25.000 e ortofotos em escala de 1:15.000.

O mapa de declividade foi produzido no módulo de variáveis topográficas do Idrisi Kilimanjaro, a partir do modelo digital de elevação acima descrito. A declividade foi

calculada em porcentagem empregando a regra de vizinhança do tipo torre (*Rook's case*), segundo o algoritmo descrito em MONMONIER (1982).

4.5.6.4. Mapa do Domínio da Mata Atlântica

O mapa da extensão geográfica do Domínio da Mata Atlântica foi construído com base nos limites da Mata Atlântica, conforme o Decreto Federal 750/93, que toma como referência espacial o Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 1993).

4.5.6.5. Mapa de Unidades de Conservação

As unidades de conservação de jurisdição federal foram mapeadas conforme as bases fornecidas pelo IBAMA, sendo que para a faixa do litoral leste do Brasil foram elaborados um mapa de UCs de Proteção Integral e outro com as UCs de Uso Sustentável. Neste último não forem incluídas as RPPNs, em função de problemas com os limites de várias destas unidades de conservação nas bases disponibilizadas pelo IBAMA.

Segundo o Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC, as Unidades de Proteção Integral tem como objetivo básico a preservação da natureza, sendo admitido o uso indireto dos seus recursos naturais, com exceção dos casos previstos na Lei do SNUC. Este grupo é composto pelas seguintes categorias de unidades de conservação:

1. Estação Ecológica: tem como objetivo a preservação da natureza e a realização de pesquisas científicas. É proibida a visitação pública, exceto com objetivo educacional e a pesquisa científica depende de autorização prévia do órgão responsável.

2. Reserva Biológica: tem como objetivo a preservação integral da biota e demais atributos naturais existentes em seus limites, sem interferência humana direta ou modificações ambientais, excetuando-se as medidas de recuperação de seus ecossistemas alterados e as

ações de manejo necessárias para recuperar e preservar o equilíbrio natural, a diversidade biológica e os processos ecológicos.

3. Parque Nacional: tem como objetivo básico a preservação de ecossistemas naturais de grande relevância ecológica e beleza cênica, possibilitando a realização de pesquisas científicas e o desenvolvimento de atividades de educação e interpretação ambiental, de recreação em contato com a natureza e de turismo ecológico

4. Monumento Natural: tem como objetivo básico preservar sítios naturais raros, singulares ou de grande beleza cênica.

5. Refúgio de Vida Silvestre: tem como objetivo proteger ambientes naturais onde se asseguram condições para a existência ou reprodução de espécies ou comunidades da flora local e da fauna residente ou migratória.

As Unidades de Uso Sustentável tem como objetivo básico compatibilizar a conservação da natureza com o uso direto de parcela dos seus recursos naturais. Este grupo divide-se nas seguintes categorias:

1. Área de Proteção Ambiental: é uma área em geral extensa, com um certo grau de ocupação humana, mas dotada de atributos abióticos, bióticos, estéticos ou culturais especialmente importantes para a qualidade de vida e o bem-estar das populações humanas, tendo como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais.

2. Área de Relevante Interesse Ecológico: é uma área em geral de pequena extensão, com pouca ou nenhuma ocupação humana, com características naturais extraordinárias ou que abriga exemplares raros da biota regional, e tem como objetivo manter os ecossistemas

naturais de importância regional ou local e regular o uso admissível dessas áreas, de modo a compatibilizá-lo com os objetivos de conservação da natureza.

3. Floresta Nacional: é uma área com cobertura florestal de espécies predominantemente nativas e tem como objetivo básico o uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e a pesquisa científica, com ênfase em métodos para exploração sustentável de florestas nativas.

4. Reserva Extrativista: é uma área utilizada por populações locais, cuja subsistência baseia-se no extrativismo e, complementarmente, na agricultura de subsistência e na criação de animais de pequeno porte, e tem como objetivos básicos proteger os meios de vida e a cultura dessas populações, e assegurar o uso sustentável dos recursos naturais da unidade.

5. Reserva de Fauna: é uma área natural com populações animais de espécies nativas, terrestres ou aquáticas, residentes ou migratórias, adequadas para estudos técnico-científicos sobre o manejo econômico sustentável de recursos faunísticos.

6. Reserva de Desenvolvimento Sustentável: conforme definição do SNUC, é uma área natural que abriga populações tradicionais, cuja existência baseia-se em sistemas sustentáveis de exploração dos recursos naturais, desenvolvidos ao longo de gerações e adaptados às condições ecológicas locais e que desempenham um papel fundamental na proteção da natureza e na manutenção da diversidade biológica.

7. Reserva Particular do Patrimônio Natural: é uma área privada, gravada com perpetuidade, com o objetivo de conservar a diversidade biológica.

4.5.6.6. Mapas de estados e municípios

Os estados e municípios representados nas áreas quaternárias costeiras foram mapeados com base nos dados fornecidos pelo IBGE, contidos respectivamente no mapa de unidades da federação e na Malha Municipal Digital de 2002.

4.5.7. OBTENÇÃO DE ÍNDICES DESCRITORES DE PADRÃO ESPACIAL

Uma das abordagens utilizadas para analisar diferentes recortes espaciais ou temporais de áreas geográficas consiste na obtenção de mensurações ou índices numéricos que procuram descrever padrões de geometria e contexto espacial.

O emprego de tais mensurações é bastante difundido no campo da Ecologia de Paisagens, onde uma pletora de tipos de variados índices de paisagem tem sido desenvolvida com vistas a associar padrões espaciais a processos ecológicos. Em termos gerais, estes índices quantificam aspectos de composição e de configuração espacial, representando descritores de área, forma, conectividade e diversidade (McGARIGAL e MARKS 1995; GUSTAFSON 1998).

As mensurações utilizadas neste estudo envolveram, além das contagens de número de manchas e planimetrias de área e perímetro, outras medidas como o índice de compactação (IC); a dimensão fractal (DF); o índice de fragmentação (IF) e o índice de diversidade (H), obtidos conforme descrito abaixo.

4.5.7.1. Índice de Compactação (IC)

O *índice C* computa a proporção de compactação de uma forma (uma mancha, um polígono) comparando a sua área com a área exibida por um círculo de igual perímetro. Por

conseguinte, esta medida também descreve o desenvolvimento da borda de uma mancha. O Índice de Compactação *(IC)* é calculado pela seguinte fórmula:

$$C = FRQ\ (Af / Ac) \qquad \text{onde,}$$

FRQ é a função de raiz quadrada;
Af é a área da forma sendo calculada e
Ac é a área do círculo de mesmo perímetro da forma sendo calculada.

4.5.7.2. Dimensão Fractal (DF)

A dimensão fractal pode servir como uma medida de textura muito útil para estudos de mudança na cobertura dos solo (LAGRO, 1991; SOARES-FILHO, 1998). O termo fractal vem da mesma raiz da palavra fração e foi usado por MANDELBROT (1983) para nomear objetos conceituais que apresentam estruturas em todas as escalas espaciais e com auto-similaridade dependente da escala.

Na geometria clássica Euclidiana a dimensão topológica de uma linha é definida como um valor inteiro igual a 1, a de um plano é igual a 2 e a de um cubo igual a 3. Entretanto, já de longo tempo os matemáticos reconhecem a possibilidade de dimensões fracionais entre estes valores (EASTMAN, 1985; LAM, 1990). A título de exemplo, à medida que uma linha torna-se mais convoluta e sua dimensão fracional aumenta (de 1 para 1,1; para 1,2 e assim sucessivamente), esta linha vai preenchendo o espaço de forma progessiva. Quando a linha tornar-se tão convoluta a ponto de preencher completamente um espaço bidimensional ela terá atingido uma dimensão fracional de 2, ou seja, a de um plano. Atualmente os matemáticos também reconhecem o conceito de um *fractal*, uma forma caracterizada não apenas por exibir convolução em seus limites a ponto de ser apropriadamente descrita pelo conceito de dimensão fracional, mas também por exibir propriedade de auto-similaridade estatística (EASTMAN, 1985; MILNE, 1988). No caso de ser dotada de auto-similaridade estatística,

uma forma parecerá apresentar a mesma natureza de convolução em várias escalas. Um caso exemplar é a linha de costa, pois quando é examinada a uma escala muito geral e, em seguida, uma seção menor desta linha é observada em grande detalhe, o padrão da área detalhada terá a mesma dimensão fractal daquela da visão mais geral.

A maneira mais comum de medir a dimensão fractal consiste em medir o comprimento de uma seção da feição com instrumentos de mensuração de precisão variada. Assim, se a forma é fractal, precisão e comprimento exibirão um relacionamento linear em um gráfico log/log, sendo que a inclinação desta linha é usada para medir a dimensão fractal (EASTMAN, 1985). O problema com esta abordagem é a lentidão de seu processamento e sua dependência de que a forma seja perfeitamente fractal em todas as escalas mensuradas. Enquanto muitas formas geográficas são fractais ao longo de várias escalas, poucas são perfeitamente fractais e deste modo podem experimentar mudanças bruscas em dimensionalidade fractal em função de mudanças de processos geomórficos. Para contornar esta situação EASTMAN (1985) desenvolveu uma técnica de passo único para calcular a dimensão fractal de formas geográficas, que foi originalmente projetada para medir a dimensão fractal de linhas.

A operação realizada neste estudo para mensurar a *Dimensão Fractal (DF)* segue a técnica de EASTMAN (1985), aplicada em varredura sobre a matriz de interesse pela convolução de uma janela ("kernel") de 3x3 *pixels*.

Paisagens compostas por formas geométricas mais simples, como retângulos e quadrados, apresentam dimensão fractal menor e que se aproxima de 1, ao passo que em paisagens compostas de formas mais complexas e convolutas a dimensão fractal aumenta. Assim sendo, mudanças substanciais na forma das manchas de uma paisagem devem ser refletidas por mudanças significativa na dimensão fractal (KRUMELL *et al*., 1987; RIPLE, 1991; SOARES-FILHO, 1998).

4.5.7.3. Índice de Fragmentação (IF)

O *Índice de Fragmentação (IF)* representa um descritor do grau de homogeneidade e de perfuração local. A operação segue o método de MONMONIER (1974), sendo aplicada em varredura sobre a matriz de interesse pela convolução de uma janela ("kernel") de 5x5 *pixels*, de acordo com a seguinte fórmula:

$$IF = (n-1) / (c/1) \quad \text{, onde}$$

n é o número de classes distintas presentes na janela de convolução e

c é o número de células consideradas no kernel.

4.5.7.4. Índice de Diversidade (H)

O *Índice de Diversidade (H)* representa um descritor do grau de heterogeneidade local em relação à diversidade global. Esta métrica constitui uma adaptação do Índice de Diversidade de Shannon, uma medida de diversidade muito utilizada em Ecologia, constituindo uma modificação desenhada para trabalhar sobre matrizes espaciais. A operação segue a técnica de TURNER (1989), sendo aplicada em varredura sobre a matriz de interesse pela convolução de uma janela ("kernel") de 5x5 *pixels*, segundo a fórmula abaixo:

$$H = -\sum_{i=1}^{m} (p.\ ln(p)) \quad \text{, onde}$$

$\sum_{i=1}^{m}$ é a soma de todas as classes presentes na matriz inteira

p é a proporção de cada classe dentro da janela de convolução e

ln é o logaritmo natural.

4.5.8. ANÁLISE DE ASSOCIAÇÃO ESPACIAL

Em qualquer exame atento da distribuição dos elementos na superfície da Terra será praticamente inescapável que um observador se depare com duas condições distintas e complementares: a *heterogeneidade espacial* e a *dependência espacial*. A ubiqüidade desta última condição foi habilmente capturada por Waldo Tobler (1970; 1979) naquela que se tornou conhecida como a Primeira Lei da Geografia: *"Todas as coisas são relacionadas, mas aquelas que estão mais próximas são mais relacionadas que as que estão mais distantes"*.

A *dependência espacial* pode ser entendida como a tendência a que o valor de uma variável associada a uma determinada localização assemelhe-se mais ao valor de suas amostras vizinhas do que aos valores ocorrentes no restante das localizações do conjunto amostral. Esta é a noção de correlação em *estatística espacial*, que segundo Anselin (1992) é um campo que se caracteriza pelo foco em investigar *padrões espaciais* de lugares e valores, identificando a *associação espacial* existente entre estes e a variação do fenômeno por localização. Quando a correlação espacial trata da medida do grau de influência que uma dada variável tem sobre si mesma utiliza-se a denominação *autocorrelação espacial*. Para alguns autores (LEGENDRE e LEGENDRE, 1998; LEGENDRE *et al*., 2002), dependência espacial implica em que a variável responde a processos e estruturas exógenos ou extrínsecos, ao passo que autocorrelação espacial resulta de resposta a processos e estruturas endógenos ou intrínsecos.

Os métodos empregados para tratar diretamente de questões como associação e heterogeneidade espacial incluem-se na classe das Análises Exploratórias de Dados Espaciais (AEDE). As AEDE são metodologias que auxiliam a descrever distribuições espaciais; detectar padrões de associação espacial ("*clusters"* espaciais); verificar a existência de diferentes regimes espaciais ou outras formas de heterogeneidade espacial e identificar observações atípicas ("*outliers"* espaciais) (ANSELIN, 1999; PEROBELLI *et al*., 2007).

Uma das técnicas mais utilizadas no estudo dos fenômenos areais é a análise da correlação espacial, sendo que entre as medidas de autocorrelação espacial detaca-se o *Índice Global de Moran (I)*, também designado Índice Global de Associação Espacial. Segundo Assunção (2001) os valores de *I de Moran* correspondem ao declive da reta de regressão, sendo que, à semelhança de um coeficiente de correlação linear, geralmente variam entre +1 e -1, quantificando o grau de autocorrelação existente. Três situações podem ser apontadas pelo índice:

- Valores de *I positivos* indicam *associação espacial* com *similaridade* entre os valores das áreas vizinhas. Quanto mais próximo de 1, o valor atribuído a uma perfeita *autocorrelação positiva (direta)*, maior é a autocorrelação espacial em padrão de atração, o que implica em uma distribuição aglomerada dos eventos.

- Valores de *I negativos* apontam *associação espacial* com *dissimilaridade* entre os valores das áreas vizinhas. Quanto mais perto de -1, o valor atribuído a uma perfeita *autocorrelação negativa (inversa)*, maior é a autocorrelação espacial em padrão de repulsão, resultando em uma distribuição aproximadamente eqüidistante dos eventos.

- Valores de *I próximos de 0*, indicam que as variáveis são *espacialmente independentes*, ou seja, *não existe autocorrelação*, implicando em uma distribuição aleatória dos eventos.

Um dos aspectos relevantes do índice de Moran é estabelecer sua validade estatística, ou seja, verificar se os valores medidos apresentam correlação espacial significativa. Para isto, torna-se necessário associar uma distribuição estatística ao índice, que pode ser efetuada para a distribuição normal e a de permutação aleatória. A primeira abordagem considera a variável em questão como tendo distribuição normal padrão, com média igual a zero e variância igual a um, onde a significância da estatística é obtida por comparação direta do valor computado

de Z com a sua probabilidade em uma tabela normal padrão. Na segunda técnica, através de permutação obtém-se a significância empírica a partir de uma distribuição I, gerada pela repetida substituição aleatória dos *n* valores pertencentes ao conjunto amostral nas *i-ésimas* localizações, calculando-se resultados a cada novo arranjo. A seguir, é feita a comparação do resultado obtido sob o arranjo espacial original com os *n* resultados obtidos nos arranjos gerados ao acaso. No caso do valor do índice I efetivamente medido corresponder a um "extremo" da distribuição simulada, infere-se que o evento tenha significância estatística. (ANSELIN, 1992; CÂMARA *et al*. 2000). Há também que se destacar que as associações espaciais identificadas como significativas através desta metodologia estão necessariamente associadas à escala e resolução espacial dos dados analisados.

Embora existam vários índices para descrever padrões espaciais, o índice global de Moran é o mais comumente empregado quando se deseja um sumário da distribuição espacial do conjunto de dados. Assim sendo, este indicador foi utilizado para investigar o padrão de distribuição geográfica dos sistemas vegetacionais do quaternário costeiro do Brasil oriental, ao longo das três escalas e níveis hierárquicos analisados:

(1) *nível + 1*: ecocomplexos de 2ª ordem na paisagem global da Mata Atlântica, resolução de 500m;

(2) *nível 0*: ecocomplexos de 1ª ordem na paisagem regional do litoral norte de SC a sul de SP, resolução de 90m;

(3) *nível -1*: ecótopos na paisagem local da planície de Superagüi, litoral norte do PR, resolução de 30m.

As análises foram efetuadas para contigüidade espacial de primeira ordem (primeiro *lag* espacial) seguindo o critério de vizinhança do tipo torre (*Rook´s case*), através dos módulos de estatística espacial do pacote Idrisi Kilimanjaro. A significância da estatística I de

Moran é avaliada pelo algoritmo nas abordagens de distribuição normal e de permutação aleatória. O algoritmo é implementado de acordo com a seguinte formalização (LORUP, 2007):

$$MORAN's\ I = n\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(y_i-\mu)(y_j-\mu)}{\left(\sum_{i=1}^{n}(y_i-\mu)^2\right)\left(\sum\sum_{i\neq j} w_{ij}\right)}$$

, onde

n é o número de valores contados (células),

w é o peso espacial (no caso Rook = 1 nas direções acima/abaixo/esquerda/direita),

$y_{i/j}$ é o valor da variável y na localização i / j ,

μ é a média dos valores de y

A autocorrelação espacial da distribuição de cada classe (de ecótopo, de ecocomplexo de 1ª ordem e de ecocomplexo de 2ª ordem) foi avaliada a partir de uma imagem-freqüência, que representou a variável analisada. Estas imagens foram criadas a partir da aplicação de um filtro de padrão de freqüência de classe, através da convolução de uma janela ("kernel") de 7x7 *pixels* em varredura sobre a matriz de ocorrência mapeada de cada classe.

4.5.9. MONITORIAS AMBIENTAIS

As monitorias ambientais constituem análises comparativas de um recorte territorial em séries temporais sucessivas, que têm como objetivo investigar tendências de transição e padrões de dinâmica espacial.

Neste capítulo foi realizada uma monitoria ambiental da distribuição dos ecocomplexos arbóreos em superfícies quaternárias da faixa costeira do leste brasileiro, com vistas a comparar uma situação pretérita e uma situação atual.

A primeira imagem temporal (t_1) consistiu em um cenário retrospectivo construído para representar a época pré-colonização européia, criado com base em mapeamentos de 1:1.000.000 das cartas geológicas da CPRM e dos mapas de vegetação do Projeto RADAM. Como segunda imagem temporal (t_2) empregou-se o mapeamento resultante da classificação dos produtos MODIS para o ano de 2001.

Uma análise das medidas descritoras de paisagem foi efetuada para testar a significância das diferenças destas variáveis entre a situação original e atual. Para tanto, utilizou-se o teste U não paramétrico de Mann–Whitney, um teste par a par que constitui boa alternativa quando o conjunto de dados não satisfaz as condições para o uso de estatísticas paramétricas (SOKAL e ROHLF, 1981). Estas análises estatísticas foram calculadas no programa *Statistica 6.0*.

4.5.10. ANÁLISE DE LACUNAS DE CONSERVAÇÃO ("GAP ANALYSIS")

A Análise de Lacunas *("Gap Analysis")* de Conservação é uma metodologia desenvolvida para identificar elementos alvo da biodiversidade (ecossistemas, comunidades, tipos de vegetação, tipos de hábitat, espécies, populações etc.) que não estejam adequadamente representadas em áreas destinadas para conservação (BURLEY, 1988; SCOTT *et al*., 1993).

Esta identificação das áreas onde existem lacunas ("gaps") de conservação constitui um instrumento de grande utilidade para a otimização do sistema de unidades de conservação, podendo ser utilizado para identificar áreas onde os conflitos de uso da terra possam ser

evitados, bem como as áreas que são mais importantes e/ou prioritárias para satisfazer necessidades de conservação.

A análise de lacunas consiste em um método de avaliação que provê uma abordagem sistemática para avaliar a proteção oferecida à biodiversidade em determinadas áreas sob análise. Esta abordagem utiliza sistemas geográficos de informação (SGIs) para identificar lacunas ("gaps") na proteção à biodiversidade, que podem ser preenchidos pelo estabelecimento de novas unidades de conservação ou por mudanças nas práticas de manejo da terra (SCOTT *et al., op. cit.*).

Neste capítulo uma análise de lacunas foi efetuada para avaliar a representação dos sistemas arbóreos quaternários costeiros dentro do sistema existente de unidades de conservação de administração federal. Para operacionalizar as planimetrias tomou-se como unidade geográfica de análise as unidades da federação.

4.5.11. CRIAÇÃO DE BANCOS DE DADOS ALFANUMÉRICOS GEOCODIFICADOS

4.5.11.1. Medidas descritoras de paisagem

Um banco de dados alfanumérico foi elaborado com os dados obtidos pelas computações das medidas descritoras de padrão espacial, referentes aos índices de paisagem de área; perímetro; índice de compactação (IC); dimensão fractal (DF); índice de fragmentação (IF) e índice de diversidade (H) de substratos geológicos e índice de diversidade (H) de grupos devegetação. A geocodificação foi realizada utilizando o centróide das manchas de ecocomplexos e ecótopos.

4.5.11.2. Levantamentos fitossociológicos

Iniciou-se a construção de um banco de dados alfanumérico contendo como informação de cadastro os levantamentos fitossociológicos realizados em sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica.

Em uma primeira etapa foram incorporados ao banco de dados atributos dos levantamentos realizados na região do litoral norte de SC ao sul de SP. De cada trabalho compilou-se informação sobre a localização das parcelas, o município em que o levantamento foi feito, a metodologia empregada no levantamento, os parâmetros fitossociológicos globais e a lista de espécies com os parâmetros fitossociológicos específicos. Atributos de tipo de solo, substrato geomorfológico e geológico, altimetria e atividades antópicas, quando disponíveis, também foram compilados. A geocodificação foi efetuada sobre a base espacial de maior detalhe, sendo que as posições dos levantamentos foram digitalizadas e relacionadas aos ecótopos.

4.6. Resultados e discussões

4.6.1. DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS CLASSES DE ECÓTOPOS

Para definir as classes de ecótopos utilizadas no mapeamento a legenda resultante totalizou 32 classes singulares de cobertura, que foram anteriormente apresentadas acompanhadas das codificações e descrições geradas pelo *Land Cover Classification System*, bem como das respectivas correspondências com o Sistema Fitogeográfico nacional adotado pelo IBGE (ver tab. 4.7).

Neste estudo de caso envolvendo o mapeamento de coberturas do solo sobre superfícies quaternárias do litoral sul brasileiro entre o norte de SC e o sul de SP, ficou

demonstrado que o sistema internacional escolhido, o *Land Cover Classifiction System*, tanto possibilitou criar uma legenda adequada para mapeamento regional detalhado quanto também permitiu a correlação de classes com o Sistema Fitogeográfico nacional, como pode ser observado na tabela 4.7. De fato, o LCCS apresentou uma performance bastante satisfatória em relação às duas tarefas demandadas.

Em termos de construção de legenda o LCCS demonstrou ser um sistema de classificação robusto, ao mesmo tempo flexível e abrangente para permitir descrever em bom detalhe as classes de cobertura existentes. Adicionalmente, o trânsito de tradução entre as classes geradas pelo LCCS e as categorias existentes no Sistema Fitogeográfico Brasileiro não apresentou grandes dificuldades.

Na comparação entre os dois sistemas supracitados, embora ambos sejam bastante consistentes, percebe-se que a flexibilidade do LCCS resulta em um melhor desempenho na definição das classes. Ao possibilitar que o usuário defina o conjunto e a seqüência dos classificadores utilizados, sem que haja perda da garantia de mútua exclusividade das classes e da comparabilidade com outras classificações existentes, o LCCS permite uma melhor acomodação das complexidades envolvidas nas atividades de mapeamento.

A título de exemplo, a flexibilidade permitida pelo LCCS na utilização do atributo ambiental pedológico possibilitou que as classes de coberturas quaternárias costeiras geradas por tal sistema e adotadas neste estudo (tab. 4.7) pudessem ser obtidas sem o emprego de atributos técnicos específicos relacionados à composição florística e/ou fitossociológica. Em contraste, ressalta-se que na ausência de informação sobre tais atributos técnicos a distinção de todas as categorias da legenda adotada não seria possível no Sistema Fitogeográfico Brasileiro. Isto pode ser observado na tabela 4.7 quando uma mesma classe no sistema do IBGE, como no caso das categorias Db, Pma, Pfa, Paa, Pmb, Pmh, apresenta correspondência com mais de uma classe do LCCS. Esta dificuldade surgiu em função da estrutura menos

flexível do sistema nacional, na qual os atributos ambientais descritores do substrato são fixos e aplicados em uma posição determinada dentro da classificação, no nível da Formação Propriamente Dita (ver tabela 4.7).

Estes resultados observados na construção da legenda indicam que o sistema de classificação de cobertura do solo global utilizado, no caso o "Land Cover Classification System - LCCS" / FAO-UNEP, permitiu definir uma legenda adequada para o mapeamento regional de sistemas quaternários do Brasil oriental.

Conforme explicado na metodologia, a partir das 32 classes singulares de coberturas do solo inicialmente definidas (ver tabela 4.7), uma revisão foi efetuada para acomodar agregações de classes que espacialmente ocorreram em composições mistas, sendo que em sua versão final a legenda completa compreendeu 23 classes de cobertura do solo, relacionadas anteriormente na tabela 4.7. Embora a definição das categorias não tenha incluído atributos técnicos específicos como composição florística ou fitossociológica, a caracterização abaixo apresentada para as 23 classes de cobertura do solo finais incluem alguma informação adicional disponível sobre aspectos não especificados na descrição diagnóstica.

1. Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo

Constituem as formações florestais distribuídas sobre terraços e planícies aluviais dos rios que deságuam no litoral, onde se desenvolvem sobre Cambissolos e em proximidade a Neossolos Flúvicos, sujeitas a algum grau menor de hidromorfia. Esta categoria está representada em legenda mista com presença de Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Baixa secundária intermediária. Como historicamente a ocupação da região litorânea deu-se nas proximidades dos rios, resulta que a quase totalidade destes ambientes encontra-se bastante interferido, sendo em boa parte substituídos por

atividades agropecuárias. As formações mapeadas são predominantemente secundárias e caracterizadas por espécies arbóreas como *Citharexylum mirianthum* (jacataúva), *Pseudobombax grandiflorum* (imbiruçu), *Sloanea guianensis* (laranjeira-imbiúva), *Ficus insipida* (figueira-branca), *Sapium glandulatum* (leiteiro), *Alchornea triplinervia* e *Alchornea sidifolia* (tapiás), *Schizolobium parahybum* (guapuruvu), *Coussapoa microcarpa* (figueira-mata-pau), *Machaerium minutiflorum* (sapuva), *Bauhinia forficata* (pata-de-vaca), S*yagrus romanzoffiana* (jerivá), *Euterpe edulis* (palmiteiro) e *Marlieria tomentosa* (guapurunga), entre outras (RODERJAN *et al*., 2002; PIRES *et al.*, 2005).

2. Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo (fig. 4.8)

Compreende as formações florestais distribuídas sobre solos da planície litorânea onde a drenagem não é muito eficiente, no caso os Espodossolos hidromórficos e os Organossolos. Nas fases mais evoluídas estas florestas paludosas são caracterizadas pelo predomínio de *Callophyllum brasiliense* (guanandi), razão de sua denominação regional de "guanandizais". Formando um estrato arbóreo contínuo entre 20 e 25 metros de altura, o guanandi é geralmente acompanhado por *Ficus luschnatiana, F. adhatodifolia* (figueiras), *Tabebuia umbellata* (ipê-da-várzea), *Tapirira guianensis* (cupiuva) e *Pseudobombax grandiflorum* (embirussu). Nos estratos inferiores são comuns *Syagrus romanzoffiana* (jerivá), *Clusia criuva* (mangue-do-mato), *Pera glabrata* (tabocuva), *Tabebuia cassinoides* (caxeta), *Euterpe edulis* (palmiteiro), *Marlierea tomentosa* (guapurunga) e *Guarea macrophylla* (RODERJAN *et al*., 1996; SILVA, 1998; PIRES *et al.*, 2005). A fase avançada da sucessão vegetacional, para fins de mapeamento, foi incluída nesta tipologia.

3. Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico (fig. 4.9)

Corresponde às formações florestais distribuídas sobre Espodossolos com melhor drenagem e mais desenvolvidos, sendo por vezes denominadas regionalmente de "florestas de tabuleiro". Apresenta dois estratos arbóreos atingindo alturas de 20 a 25m, sendo que um terceiro estrato de emergentes eventualmente ultrapassa 30m. Como espécies arbóreas, são típicas a *Tapirira guianensis* (Cupiúva), *Ocotea pulchella* (canelinha), *O. aciphylla* (canela-amarela), *Alchornea triplinervia* (tapiá), *Ficus organensis* (figueira), *Podocarpus sellowii* (pinho-bravo) e *Manilkara subcerisea* (maçaranduba), entre outras. Ocasionalmente também *Callophyllum brasiliense* (guanandi) pode ocorrer como emergente. No estrato inferior são comuns *Andira anthelmintica* (jacarandá-lombriga), *Clethra scabra* (carne-de-vaca), *Inga* spp (ingás), *Ilex* spp (caúnas), além de Arecaceae *Euterpe edulis* (palmiteiro), *Syagrus romanzoffiana* (jerivá) e *Attalea dubia* (indaiá), bem como uma considerável variedade de Myrtaceae dos gêneros *Calyptranthes*, *Gomidesia*, *Myrcia*, *Psidium, Eugenia* e *Marlierea* (NEGRELLE, 1995; JASTER, 1995; 2002; RODERJAN *et al*., 2002; PIRES *et al*., 2005). A fase avançada da sucessão vegetacional, para fins de mapeamento, foi incluída nesta tipologia.

4. Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico (fig. 4.10)

Conhecida localmente como "manguezal" ou "manguezal alto", esta formação desenvolve-se em terrenos de planície de maré, na desembocadura de cursos de água doce no mar, sobre solos halomórficos inundados periodicamente pela ação das marés. Apresenta dois estratos arbóreos, onde o estrato superior é mais aberto e pode atingir 10 m de altura. *Avicennia shaueriana* (mangue-negro ou siriúba) é a espécie dominante neste estrato, sendo que *Laguncularia racemosa* (mangue-branco) e *Rhizophora mangle* (mangue-vermelho) ocupam o estrato mais baixo e fechado, que atinge entre 4 a 7m de altura (RODERJAN *et al*., 1996; CUNHA-LIGNON, 2001; IAP/PRÓ-ATLÂNTICA, 2006).

5. ***Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico*** *(fig. 4.10)*

Distribuída em planícies aluviais e sobre solos influenciados por algum grau de hidromorfia, esta formação constitui legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária, Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo, desenvolvendo-se sobre Gleissolos, Neossolos Flúvicos ou Cambissolos gleicos. Esta vegetação apresenta dois estratos arbóreos e atinge de 10 até 15m, tendo com espécies dominantes *Citharexylum mirianthum*, *Coussapoa microcarpa*, *Marlieria tomentosa, Guarea macrophylla, Alchornea triplinervia*.

6. ***Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo*** *(fig. 4.8)*

Ocorrendo preferencialmente nas depressões entre os cordões litoraneos e sobre solos influenciados por condições hidromórficas, esta formação apresenta dois estratos arbóreos e atinge de 10 até 15m. Constitui legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo, Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico. Como espécies arbóreas dominantes nesta formação encontram-se principalmente *Calophyllum brasiliense* (guanandi), *Tapirira guianensis* (cupiúva), *Pouteria beaurepairei* (baga-de-macaco), *Rapanea intermedia* (capororoca), *Tabebuia cassinoides* (caxeta), enquanto o estrato arbóreo inferior e o subosque é constituído basicamente por mirtáceas, dentre as quais se destacam *Myrcia grandiflora, M. racemosa, M. insularis* (guamirins), *Marlierea tomentosa* e *M. reitzii* (guapurungas) (SILVA, 1998; IAP/PRÓ-ATLÂNTICA, 2006).

7. Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico (fig. 4.9)

Estas formações arbóreas desenvolvem-se preferencialmente nas partes altas dos cordões litorâneos, sobre Espodossolos de drenagem rápida e lençol freático mais profundo. Caracterizam legenda mista, ocorrendo em proximidade de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo. Apresentam dois estratos arbóreos e pode atingir de 10 até 15 metros de altura. Como espécies dominantes destacam-se *Pera glabrata* (seca-ligeiro)*, Ilex theezans* (caúna)*, Andira anthelmintica* (jacarandá-lombriga), *Psidium cattleianum* (araçá)*, Ocotea pulchella* (canela-lageana), *O. aciphylla* (canela-amarela), *Erythroxylum amplifolium* (cocão), *Myrcia multiflora* (guamirim), *Tapirira guianensis* (cupiúva), *Clusia criuva* (mangue-do-mato), *Ternstroemia brasiliensis* (manjuruvoca) e *Ilex pseudobuxus* (cauninha) (SILVA, 1998; PIRES *et al.*, 2005; RODRIGUES, 2006).

8. Formação Arbórea Média secundária intermediária (fig. 4.11)

Constituindo vegetação secundária em estádio intermediário mais tardio, esta formação já apresenta dois estratos arbóreos, podendo atingir mais de 10m em altura. Além das espécies que já foram citadas na caracterização da classe Formação Arbórea Baixa Secundária Intermediária, esta vegetação já apresenta uma diversidade maior, incorporando outras espécies características das formações florestais originais. Embora tais formações não estejam associadas a um tipo de substrato pedológico, ocorre que em solos não-hidromórficos estas espécies adicionais incluem, por exemplo, *Tapirira guianensis, Andira anthelminthica, Alchornea triplinervia, Hieronima alchorneoides, Pera glabrata*, enquanto que em solos hidromórficos aparecem *Tabebuia cassinoides, Calophyllum brasiliensis, Marlieria tomentosa, Syagrus romanzoffiana*, entre outras (RODERJAN *et al*., 1996; LOLIS, 1996;

WIESNIEWSKI, 1997; BRITEZ e SILVA, 2000; SALIMON e NEGRELLE, 2001; PIRES *et al.*, 2005). Conhecida como "capoeira" e às vezes "capoeirão", esta vegetação corresponde ao final da quarta fase sucessional dentre as cinco em que se classifica a vegetação secundária segundo o Sistema do IBGE. De acordo com a legislação vigente, esta vegetação, em conjunto com a Formação Arbórea Baixa Secundária Intermediária anteriormente descrita, constitui o *Estágio Intermediário da Sucessão Vegetal*.

9. Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico (fig. 4.12)

Estas formações ocorrem preferencialmente nas partes altas dos cordões litorâneos, sobre Espodossolos de drenagem rápida, pouco desenvolvidos, em proximidade a Neossolos Quartzarênicos não-hidromórficos. Apresentam um único estrato arbóreo com altura em torno dos 4 a 7m, onde se destacam como espécies dominantes *Ternstroemia brasiliensis* (manjuruvoca) *, Ilex theezans* (caúna)*, Psidium cattleianum* (araçá)*, Ocotea pulchella* (canela-lageana), *Clusia criuva* (mangue-do-mato), *Schinus terebinthifolius* (aroeira)*, Gomidesia schaueriana, Ilex pseudobuxus* (cauninha), *Pera glabrata* (seca-ligeiro), *Tapirira guianensis* (cupiúva) e *Andira anthelmintica* (jacarandá-lombriga) (SILVA, 1998; PIRES *et al.*, 2005; IAP/PRÓ-ATLÂNTICA, 2006). Destaca-se a presença de epífitas, sobretudo bromeliáceas, orquidáceas e líquens, bem como de bromélias terrícolas e pteridófitas.

10. Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo tiomórfico (fig. 4.10)

Popularmente denominada "manguezal", esta vegetação ocorre em planícies de maré, sobre solos tiomórficos inundados segundo o ciclo das marés. O único estrato presente atinge entre 4 e 7m de altura é composto de poucas espécies arbóreas, onde há um predomínio de *Laguncularia racemosa* (mangue-branco), seguida por *Rhizophora mangle* (mangue-

vermelho) e uma menor proporção de *Avicennia shaueriana* (mangue-negro ou siriúba) (RODERJAN *et al*., 1996; CUNHA-LIGNON, 2001; IAP/PRÓ-ATLÂNTICA, 2006).

11. Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo *(fig. 4.12)*

Ocorrendo em depressões intercordões e em abaciados úmidos, sob forte influência de hidromorfia, estas formações desenvolvem-se sobre Organossolos, apresentando um único estrato arbóreo entre 4 e 7 m, geralmente denso e composto predominantemente por uma ou poucas espécies arbóreas. Nestas situações são comuns as formações conhecidas como caxetais, onde domina a *Tabebuia cassinoides* (caxeta), com a presença de *Tabebuia umbellata* e *Marlierea tomentosa* (GALVÃO *et al*., 2002; RODERJAN *et a*l., 2002).

12. Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico *(fig. 4.12)*

Esta formação compõe legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo. Ocorre em planícies aluviais, sujeita a alto grau de hidromorfia, desenvolvendo-se sobre Gleissolos, Neossolos Flúvicos ou Cambissolos gleicos, por vezes em proximidade a Organossolos. Apresenta um único estrato arbóreo com altura média geralmente em torno de 5 a 6m, onde se destacam como espécies dominantes *Myrcia insularis, Myrcia spp., Marlieria tomentosa, Coussapa microcarpa, Inga spp., Pouteria beuparei, Guarea macrophylla, Maytenus robusta* (SVOLENSKI, 2000).

13. Formação Arbórea Baixa secundária intermediária *(fig. 4.8)*

Constitui vegetação secundária em fase intermediária, esta formação é composta de um único estrato arbóreo com altura em torno dos 4 a 5 m, onde são freqüentes várias

espécies de Melastomataceae, popularmente conhecidas como jacatirão e\ou quaresmeira, dentre as quais se destacam *Tibouchina pulchra e Miconia cinnamomifolia*. Dominam também as embaúbas (*Cecropia glaziovii* e *Cecropia pachystachya*) e a jacataúva (*Citharexylum myrianthum*), além da presença de *Trema micrantha* (crindiúva), *Rapanea ferruginea* (capororoca) e *Myrcine coriacea* (RODERJAN *et al*., 1996; BRITEZ e SILVA, 2000; PIRES *et al.*, 2005). Estas formações secundárias não estão associadas a um tipo de substrato pedológico particular. Contudo, quando se desenvolvem sobre Espodossolos não-hidromórficos a composição de espécies costuma apresentar *Ilex theezans, Ternstroemia brasiliensis, Ocotea pulchella* e *Psidium cattleianum* (LOLIS, 1996; WIESNIEWSKI, 1997; SALIMON e NEGRELLE, 2001). Denominada popularmente de "capoeira", esta vegetação corresponde ao início da quarta fase sucessional entre as cinco em que se classifica a vegetação secundária segundo o Sistema do IBGE.

14. Formação Arbustiva sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo *(fig. 4.13)*

As formações desta classe ocorrem em depressões úmidas em situações variadas, fortemente influenciadas por inundações, sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolos. Apresentam composição onde sobressaem elementos arbustivos e arvoretas, por vezes associados a elementos herbáceos, com predomínio de poucas espécies características, tais como as formações denominadas localmente de maricais (com *Mimosa bimucronata*, o maricá), além de ariticunzais (com *Annona glabra*, o ariticum-do-brejo) e guanandizais (com *Callophyllum brasiliense*, o guanandi) (BORNSCHEIN, 2001; PIRES *et al.*, 2005). Também ocorrem os agrupamentos de *Tibouchina trichopoda* (jacatirão-do-brejo)*, T. multiceps, Erythrina speciosa* (suinã) e *Rapanea intermedia* (capororoca) (PIRES *et al.*, 2005).

15. Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico *(fig. 4.13)*

Ainda que apresente uma extensão espacial muito reduzida, ocupando uma estreita faixa de terreno após a linha de praia, esta classe complexa inclui um mosaico de coberturas vegetacionais desde herbáceas até arbustivas, que se desenvolvem em substratos recentes e muito pobres. Esta categoria compõe uma legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico; Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico e Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico hidromórficos.

As formações herbáceas ocorrem principalmente nas faixas de praia e ante-dunas, em locais que eventualmente podem ser atingidos pelas marés mais altas. A predominância nas praias e dunas recentes é de espécies herbáceas, estoloníferas, rizomatosas e/ou cespitosas, que formam uma cobertura descontínua, que raramente ultrapassa 50 cm de altura, dentre as quais destacam-se *Spartina ciliata, Panicum sp, Sporobolus virginicus* e *Stenotaphrum secundatum*, *Ipomoea pescaprae* e *I. littoralis*, *Hydrocotile bonariensis* e *Apium prostatum*, *Blutaparon portulacoides*, *Cyperus obtusatus, C. polystachyos* e *C. ligularis, Vigna luteola*, *Dickia encholirioides*, *Epidendrum fulgens* e *Cyrtopodium polyphyllum*. Em locais um tanto mais afastados da atual linha de praia, com vegetação mais desenvolvida e já estabilizada, destacam-se espécies arbustivas baixas, com maior cobertura, e alturas que variam de 50cm a 2m, onde o marmeleiro-da-praia (*Dalbergia ecastophylla*) é o elemento mais característico. É relativamente comum encontrar-se sob os indivíduos desta espécie espécies herbáceas das zonas de praia, já citadas, além de indivíduos jovens de espécies lenhosas, tais como *Calophyllum brasiliense* e *Annona glabra*. Outras espécies de hábito arbustivo que freqüentemente ocorrem nestes locais são *Tibouchina clavata*, *Cordia verbenacea*, *Eupatorium casaretoi* e *Sophora tomentosa*, além de outras características das fisionomias arbustivo-arbóreas mais desenvolvidas da planície costeira (BRITEZ e SILVA, 2000).

Na seqüência desta faixa anteriormente descrita, que pode apresentar largura variável e que inclui a parte superior da praia (zona supralitoral) e as pequenas dunas estabilizadas, ocorre um tipo vegetacional arbustivo fechado, com altura média de até 3m, que tem como espécies mais características *Clusia criuva*, *Guapira opposita*, *Tapirira guianensis* e *Schinus terebinthifolius*, *Ocotea pulchella*, *Ternstroemia brasiliensis*, *Pera glabrata* , *Maytenus robusta*, *Rapanea venosa* e *R. parvifolia*, *Ilex theezans*, *Eugenia umbelliflora* e *Psidium cattleianum* (SILVA, 1998).

Uma outra formação bastante característica encontrada nesta região é constituída por arbustos e arvoretas com altura média de 3m, que formam agrupamentos semelhantes a "moitas" de formato e tamanho variáveis, intercalados por áreas abertas e muitas vezes com uma cobertura praticamente contínua de musgos e líquens. Destacam-se entre os elementos arbustivo-arbóreos característicos desta fisionomia as espécies *Clusia criuva, Guapira opposita, Psidium cattleianum, Ternstroemia brasiliensis, Ocotea pulchella, , Tapirira guianensis* e *Ilex theezans*, além de *Erythroxylum amplifolium*, *Abarema lusoria*, *Myrcia multiflora* e *Andira fraxinifolia*. Outra espécie típica destas formações é a a camarinha (*Gaylussacia brasiliensis*), pequeno arbusto de até 1,5m de altura, que ocorre de forma bastante expressiva sobretudo nas orlas das moitas e/ou nos locais mais abertos, chegando às vezes a formar agrupamentos quase homogêneos (SILVA, 1998; BRITEZ e SILVA, 2000).

16. Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo *(fig. 4.14)*

Ocorrendo em depressões intercordões e abaciados úmidos, sujeitas a inundações e alta hidormorfia, estas formações desenvolvem-se sobre Organossolos, Neossolos Flúvicos ou Gleissolos. São constituídas principalmente por espécies herbáceas das famílias Cyperaceae, Poaceae e Typhaceae, além de Xyridaceae, Lentibulariaceae e Alismataceae, onde destacam-

se como espécies mais características *Typha domingensis* (taboa), *Fuirena umbellata* e *Scirpus californicus* (piri) (RODERJAN *et al*., 1996; BORNSCHEIN, 2001).

17. Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – marismas e brejos de maré (fig. 4.14)

Distribuída em ambientes de planície de maré, esta formação compreende os sistemas de marismas e brejos de maré, compondo legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Gleissolo tiomórfico.

Os marismas ou campos salinos aparecem em ambientes salobros, entre os manguezais e a baía, caracterizando uma associação tipicamente herbácea composta por número reduzido de espécies halófilas, onde destaca-se uma poácea denominada popularmente de praturá (*Spartina montevidensis, S. alterniflora*) (RODERJAN *et al*., 1996; IAP/PRÓ-ATLÂNTICA, 2006).

Os brejos de maré ocorrem nas partes mais internas das baías, em locais onde existe maior aporte fluvial, constituindo formações herbáceas onde dominam uma ou algumas espécies tais como *Scirpus californicus* (piri), *Crinum salsum* (ceboleiro) e *Juncus maritimus* (junco). Por vezes pode aparecer *Cladium mariscus* (capim-serra) ((RODERJAN *et al*., 1996; BORNSCHEIN, 2001).

A Formação Arbustiva apresenta agrupamentos de espécies de maior porte como as pteridófitas *Acrostichum danaefolium* (samambaia-do-mangue) e *Blechnum serrulatum* (samambaia-do-brejo), arbustos de *Hibiscus tiliaceus* (uvira) e *Dalbergia ecastophylla* (marmeleiro-da-praia), entremeados de forma esporádica por arvoretas de *Laguncularia racemosa* (mangue-branco), *Avicenia schaueriana* (siriúba), *Callophylum brasiliense* (guanandi), *Annona glabra* (ariticum-do-brejo) e *Tabebuia cassinoides* (caxeta) (RODERJAN *et al*., 1996; BORNSCHEIN, 2001; IAP/PRÓ-ATLÂNTICA, 2006).

18. Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – zona de <u>Cladium</u> *(fig. 4.14)*

Compondo legenda mista com presença de Solo Exposto, esta zona de vegetação ocorre geralmente em forma de longas e estreitas faixas entre os manguezais e a planície, sofrendo inundações apenas nas marés altas de sizígia e de tormenta. Conhecida também como brejo de capim-serra, esta é uma formação aberta dominada por herbáceas onde *Cladium mariscus* (capim-serra) é a espécie dominante. Ocorrem também as herbáceas *Fimbristylis spadicea*, *Paspalum distichum* (capim-pacuã), além de esparsos arbustos de *Hibiscus tiliaceus* (uvira) e arvoretas de *Annona glabra* (ariticum-do-brejo), *Conocarpus erectus* (mangue-bola), *Laguncularia racemosa* (mangue-branco), *Avicenia schaueriana* (siriúba), *Rapanea parvifolia* (capororoquinha) e *Schinus terebenthifolius* (aroeira). Em partes quase desprovidas de vegetação podem ocorrem apenas alguns elementos de *Salicornia*, *Paspalum* e filmes algálicos (ANGULO, 1992; BORNSCHEIN, 2001).

19. Cultivo arbóreo

Esta classe compreende os plantios de cultivares arbóreos, que na região são formados quase totalmente por espécies do gênero *Pinus*, incluindo também alguns raros povoamentos de *Eucalyptus*.

20. Cultivo não graminóide

Esta categoria corresponde a plantios de cultivares não graminóides onde predomina largamente a banana (*Musa*).

21. Cultivo graminóide

Esta classe apresenta composição mista de Cultivo Graminoíde, Pastagem, Formação Herbácea Secundária Inicial e Formação Arbustiva Secundária Inicial.

Os cultivos estão representados principalmente por plantios de arroz (*Oryza*), além de pequenas plantações de mandioca (*Manihot*).

As pastagens compreendem áreas utilizadas para a pecuária extensiva de gado bubalino e bovino.

A Formação Herbácea Secundária Inicial consiste na primeira vegetação a ocupar terrenos abandonados pela agropecuária, constituída essencialmente por plantas herbáceas, notadamente das famílias das poáceas (*e.g. Imperata brasiliensis*), ciperáceas (tiriricas), asteráceas (*e.g. Vernonia spp.*, *Eupatorium*) e de diversas pteridófitas (*e.g. Pteridium aquilinum* e *Blechnum serrulatum*), bem como melastomatáceas, rubiáceas e leguminosas, entre outras (BRITEZ e SILVA, 2000; PIRES *et al.*, 2005). Popularmente denominada de "capoeirinha", esta vegetação corresponde às duas primeiras das cinco fases sucessionais em que se classifica a vegetação secundária segundo o Sistema do IBGE.

A Formação Arbustiva Secundária Inicial já apresenta maior diversificação de herbáceas e inclusão de arbustivas, assim como lenhosas arbóreas de pequeno porte e efêmeras. Nesta vegetação conhecida popularmente como "vassoural" ou "capoeira rala", destacam-se espécies de asteráceas do gênero *Baccharis* ("vassouras") e de melastomatáceas (pixiricas, jacatirões e quaresmeiras) (BRITEZ e SILVA, 2000; PIRES *et al.*, 2005). Corresponde à terceira fase sucessional secundária do IBGE.

Em conjunto, estas duas formações secundárias acima descritas constituem o que a legislação vigente classifica como *Estágio Inicial da Sucessão Vegetal*.

22. Superfície terrestre não-vegetada

Esta categoria engloba as superfícies terrestres desnudas, formando uma legenda mista composta por Áreas Urbanas, com presença de Solo Exposto, Estruturas Lineares (*e.g.* estradas, linhas de transmissão) e/ou Praia.

23. Superfície líquida

Esta classe congrega as superfícies líquidas naturais (*e.g.* mar, canais de maré, rios, lagoas) e artificiais (*e.g.* açudes, represas).

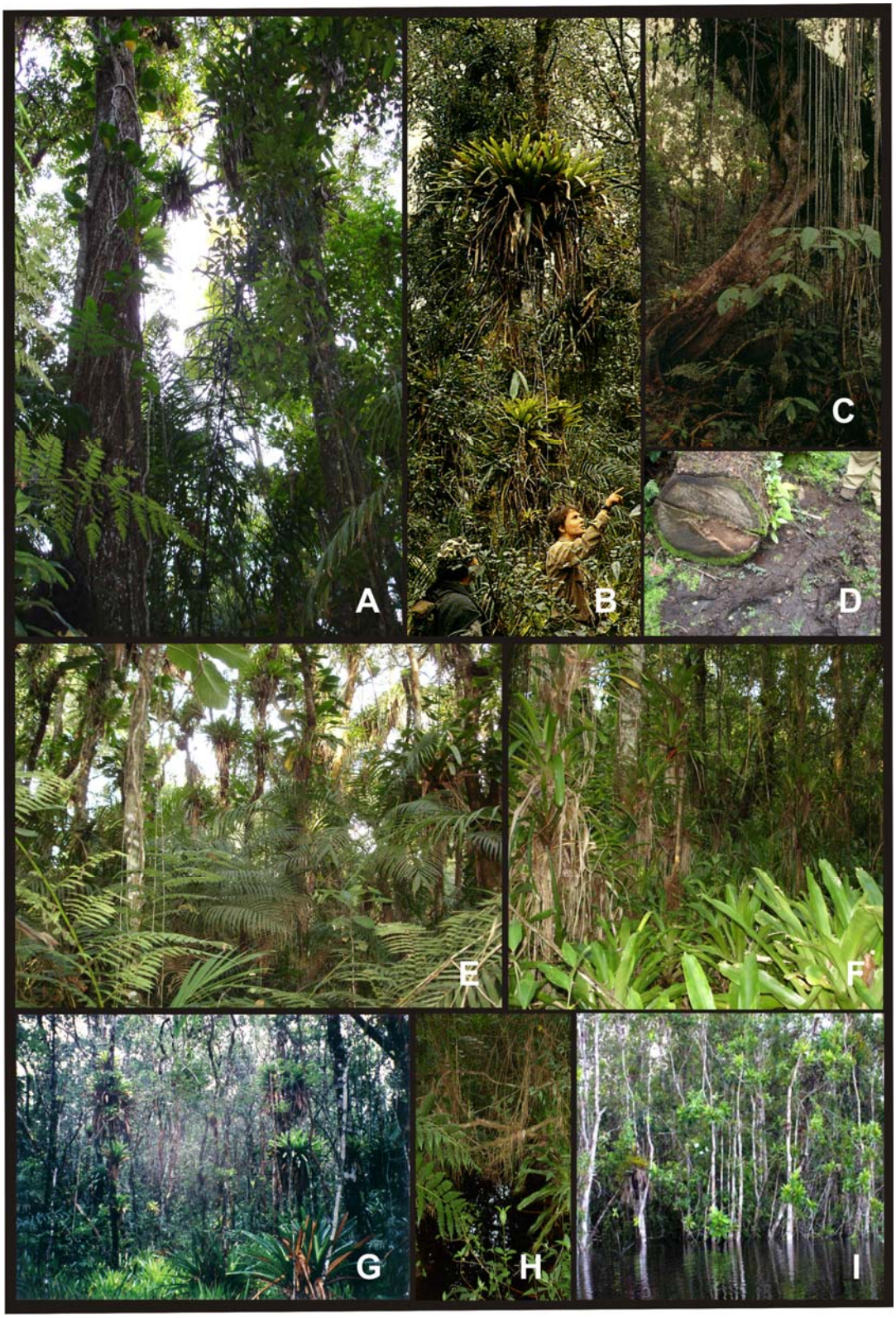


Figura 4.8. Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo: (A) *Callophyllum brasiliense* (guanandi); (B) grandes bromélias epífitas; (C) *Ficus sp.* (figueira); (D) Espodossolo hidromórfico. Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo: (E) vista interna; (F-G) bromélias epífitas e de chão; (H) Organossolo inundado; (I) caxetal inundado, formação de *Tabebuia cassinoides* (caxeta).

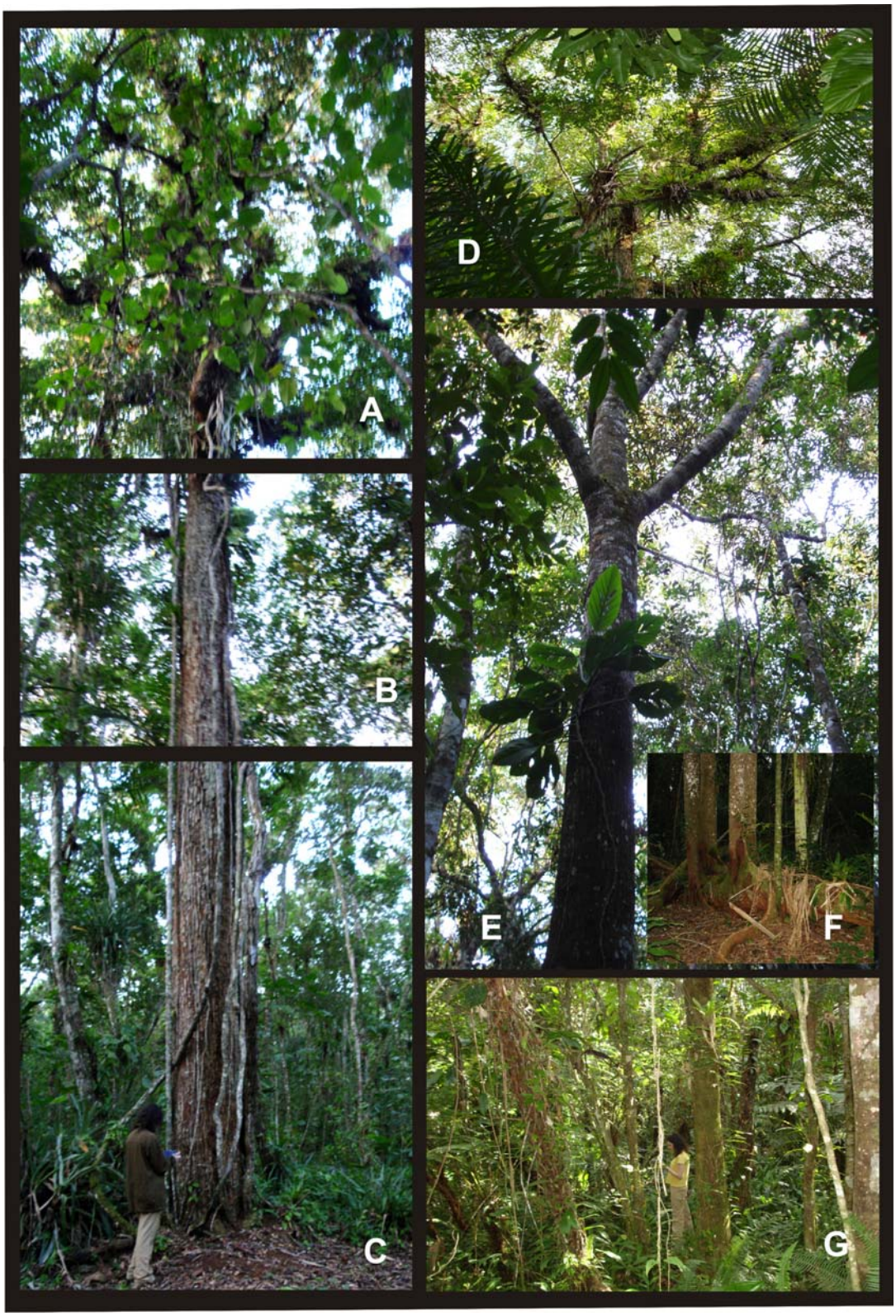


Figura 4.9. Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico: (A-C) *Manilkara subsericea* (massaranduba); (D) dossel do estrato arbóreo mostrando *Euterpe edulis* (palmito jissara) e grandes bromélias epífitas; (E) *Tapirira guianensis* (cupiúva); (F) raízes de cupiúva e Espodossolo não-hidromórfico. Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico: (G) interior da formação.

Figura 4.10. Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico: (A) vista externa da formação com *Avicennia shaueriana* (mangue-negro ou siriúba). Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo tiomórfico: (B) vista externa da formação com *Laguncularia racemosa* (mangue-branco) e *Rhizophora mangle* (mangue-vermelho); (C-D) Gleissolo tiomórfico. Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico: (E) vista interna da borda da formação; (F) Cambissolo gleico.

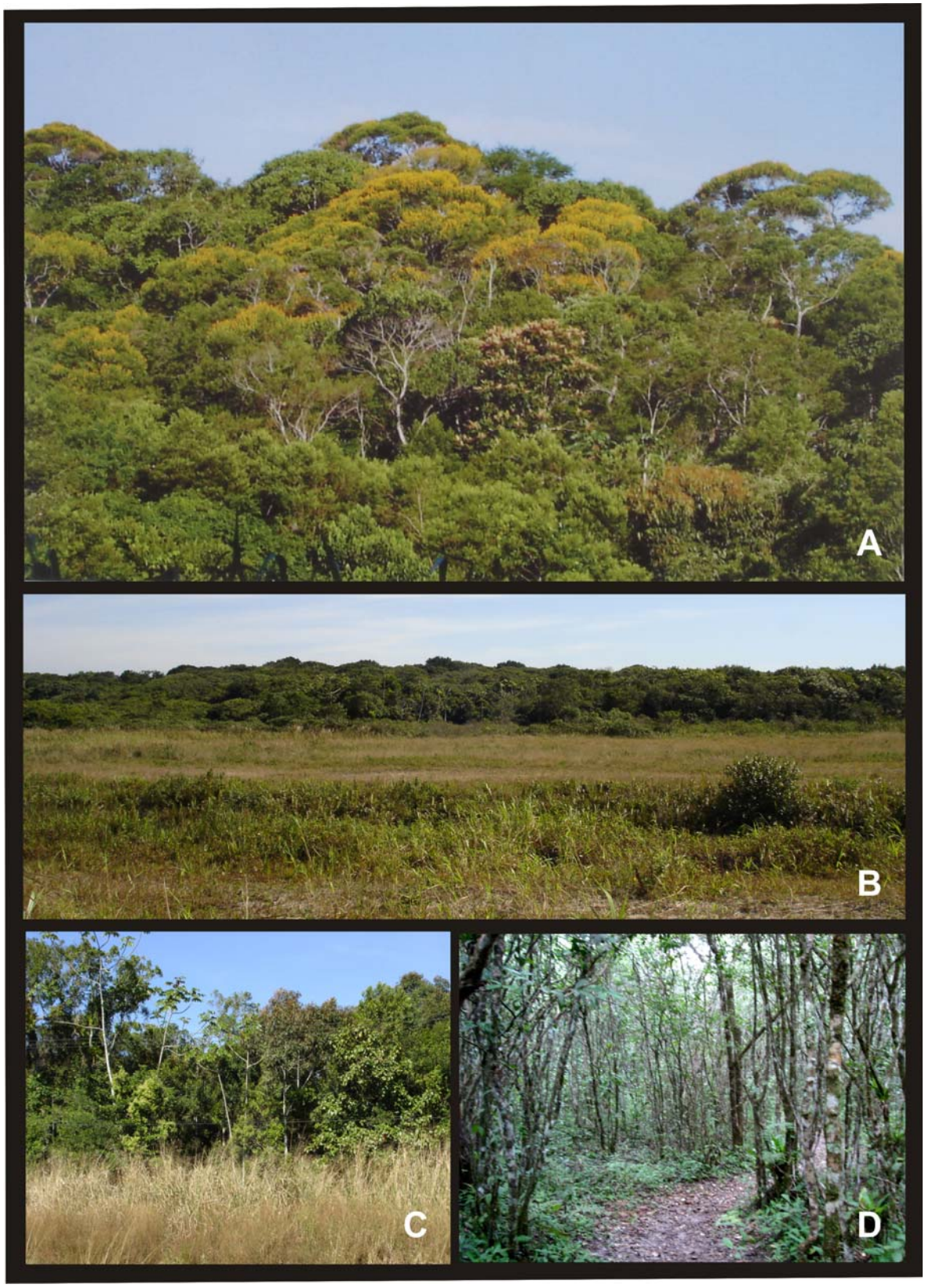


Figura 4.11. Formação Arbórea Média secundária intermediária: (A). Formação Arbórea Baixa secundária intermediária: (B-D).

Figura 4.12. Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico: (A) vista interna da formação mostrando pequenas bromélias epífitas; (B) clareira interna com líquens no chão; (C) bromélias de chão; (D) Espodossolo não-hidromórfico. Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo: (E) vista externa da formação com *Tabebuia cassinoides* (caxeta). Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico: (F) *Inga sp*. em Neossolo Flúvico.

Figura 4.13. Formação Arbustiva sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo: (A) *Erythrina speciosa* (suinã); (B) agrupamentos de *Tibouchina trichopoda, T. multiceps*; (C-D) *Mimosa bimucronata* (maricá). Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico: (E) formação com *Clusia criuva* e bromélias de chão; (F) transição da vegetação arbustiva para a formação herbácea de praia.

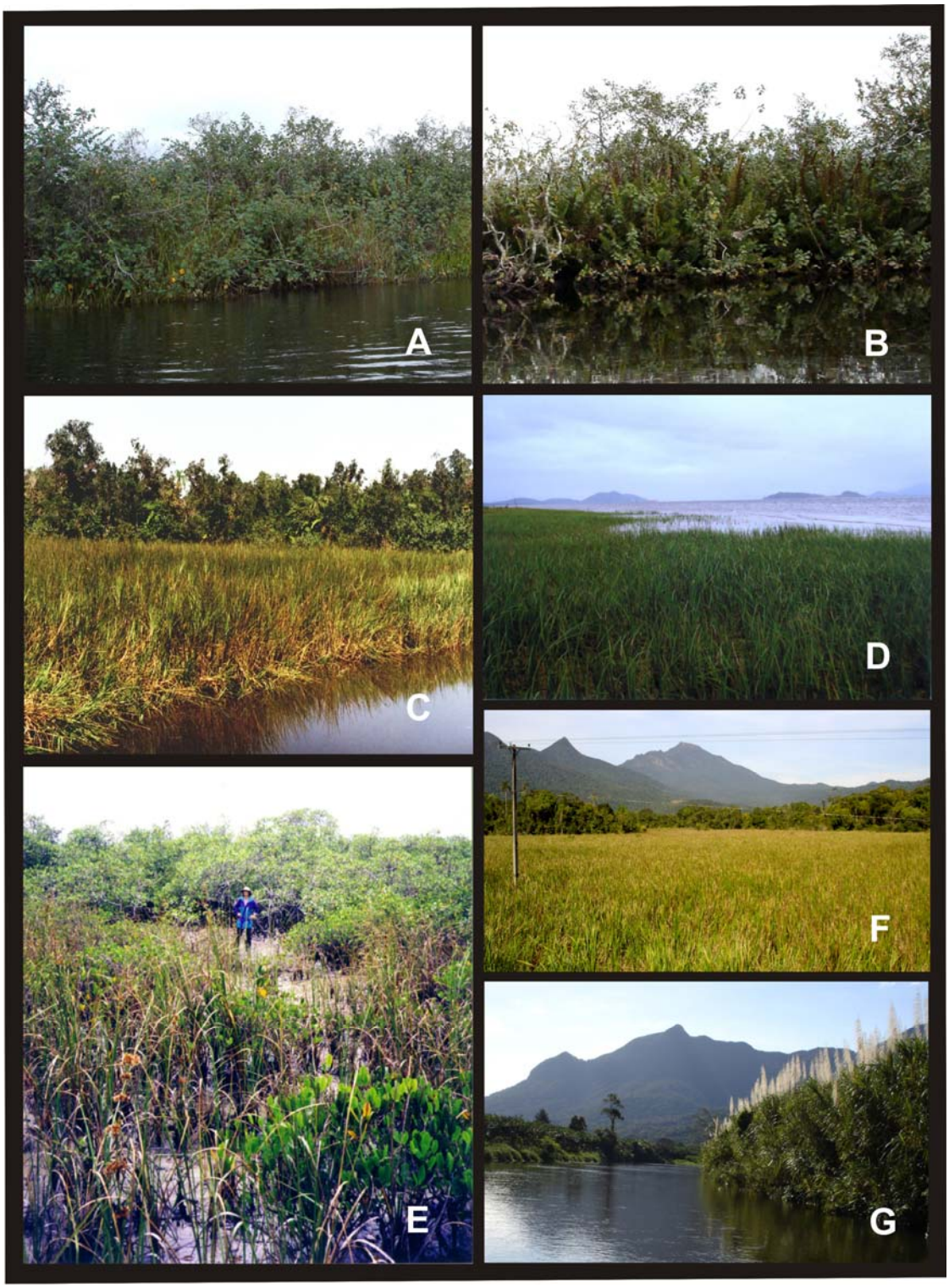


Figura 4.14. Formação Arbustivas e Herbáceas sobre Gleissolo tiomórfico - Brejos de maré: A) associação da herbácea *Cladium mariscus* (capim-serra) com a arbustiva *Hibiscus tiliaceus* (uvira) e algumas arvoretas de *Annona glabra* (ariticum-do-brejo); (B) associação com *Acrostichum danaefolium* (samambaia-do-mangue) e algumas arvoretas de *Annona glabra*; (C) associação das herbáceas *Scirpus californicus* (piri), *Crinum salsum* (ceboleiro) e *Juncus maritimus* (junco). - Marisma: (D) formação dominada por *Spartina sp*. (praturá). - Zona de *Cladium*: (E) formação aberta dominada por *Cladium mariscus* (capim-serra). Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo: (F) formação dominada por *Typha domingensis* (taboa); (G) formação dominada por ubá.

4.6.2. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E SELEÇÃO DOS ALGORITMOS DE CLASSIFICAÇÃO DIGITAL

Conforme descrito na seção de materiais e métodos, a avaliação de desempenho das classificações realizadas pelos algoritmos de Fisher, de Máxima Verossimilhança e de Rede Neural Artificial baseou-se no cruzamento entre os mapeamentos produzidos e os pontos de verdade terrestre, que totalizaram 2417 pontos de avaliação para a região litorânea entre norte de SC e sul de SP.

O resultado da análise de desempenho das classificações efetuadas sobre as seis bandas originais Landsat7/ETM+ com emprego dos três algoritmos investigados encontra-se demonstrado na tabela 4.12.

Em uma comparação ao nível de categoria, como pode ser observado nesta tabela, o produto do algoritmo de Fisher alcançou valores de Kappa correspondentes a um padrão de classificação (*sensu* LANDIS e KOCH,1977) de ruim a razoável para 43,48% das classes (BO/NF/G, CA, AMGt, ABGt, ABS, CHNG, HO/NF/G, ABEn, AMEh/O e ABG/NF/Cg), de moderado a bom para 17,39% das categorias (BNQn, AMS, AMG/NF/Cg e CHG), de muito bom para outros 17,39% (STNV, AMEn, ABO e AAC) e de muito bom a excelente para 21,74% das classes (HGtC, AAEn, AAEh/O, HGtB e SL).

Para o produto resultante do algoritmo de Máxima Verossimilhança (Maxlike), os valores de Kappa foram associados a um resultado ruim a razoável para 13,04% das classes (BO/NF/G, ABGt e ABS), moderado a bom para 26,09% (AMEh/O, ABG/NF/Cg, BNQn, CHG, HO/NF/G e ABEn) e muito bom a excelente para 56,52% das categorias (CHNG, STNV, AAC, AMG/NF/Cg, AMS, CA, AMEn, HGtC, ABO, AAEh/O, AAEn, HGtB e SL).

Já no produto obtido com o algoritmo de Rede Neural Artificial, valores de Kappa correspondentes a resultados de ruim a razoável e de moderado a bom foram observados

apenas para uma classe cada, respectivamente as categorias CA e AAEh/O. Para todas as outras 21 classes (91,3%), os resultados do índice Kappa foram equivalentes a um padrão de classificação de muito boa a excelente.

Ao nível da classificação geral, os valores de Kappa alcançados pelos três produtos também confirmam a melhor performance do algoritmo de Rede Neural Artificial, cujo Kappa de 0,84 pode ser considerado excelente. O segundo melhor resultado foi obtido pelo algoritmo de Máxima Verossimilhança (0,76) e o terceiro pelo classificador de Fisher (0,63), sendo que ambos podem ser considerados muito bons segundo a classificação LANDIS e KOCH (1977). De acordo com o teste de McNemar, estas diferenças de performance entre os algoritmos classificadores foram estatisticamente significativas ($p < 0,0001$).

Ainda que os valores de Kappa para as classes apresentem maior variação, ressalta-se que o valor global deste índice aponta um melhor desempenho do classificador de Rede Neural Artifical sobre os classificadores de análise discriminante de Fisher e de Máxima Verossimilhança.

Cabe também registrar que, em termos de resultado visual do produto gerado, os melhores mapeamentos foram produzidos pela RNA, seguida por MAXLIKE e por último pela LDA de Fisher, cujo produto apresentou uma performance bem inferior no aspecto visual.

Assim sendo, registra-se que o maior índice Kappa global coincidiu com a melhor representação visual do mapeamento, o que parece corroborar a eficiência desta estatística como bom indicador de desempenho das classificações.

Tabela 4.12. Matriz comparativa dos Índices de Concordância Kappa ("Kappa Index of Agreement"- KIA) geral e por categoria, resultantes das classificações realizadas com os algoritmos de Fisher, de Máxima Verossimilhança (Maxlike) e de Rede Neural Artificial (RNA).

		KAPPA		
		FISHER	**MAXLIKE**	**RNA**
CLASSES	**AAEn**	0.91	0.98	0.72
	ABS	0.17	0.38	0.72
	AMS	0.47	0.83	0.63
	SL	1.00	1.00	1.00
	STNV	0.62	0.76	0.97
	AAEh/O	0.93	0.93	0.57
	AMG/NF/Cg	0.51	0.82	0.78
	AMEh/O	0.40	0.45	0.71
	ABGt	0.14	0.19	0.65
	ABG/NF/Cg	0.40	0.51	0.62
	BNQn	0.42	0.53	0.86
	CHG	0.52	0.55	0.72
	CHNG	0.27	0.72	0.73
	HO/NF/G	0.31	0.55	0.82
	HGtB	0.96	0.99	0.85
	HGtC	0.87	0.87	0.73
	CA	0.01	0.85	0.20
	ABO	0.71	0.90	0.81
	ABEn	0.37	0.59	0.78
	AMGt	0.09	1.00	0.89
	AMEn	0.68	0.86	0.85
	BO/NF/G	0.00	0.00	0.80
	AAC	0.80	0.80	0.80
	GERAL	***0.63***	***0.76***	***0.84***

Legenda das classes: (**AAEn**) Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Média secundária intermediária; Formação Arbórea Baixa secundária intermediária)*. (**ABS**) Formação Arbórea Baixa secundária intermediária. (**AMS**) Formação Arbórea Média secundária intermediária. (**SL**) Superfície líquida. (**STNV**) Superfície terrestre não-vegetada *(Área urbana em legenda mista com presença de Solo Exposto; Estruturas lineares e Praia)*. (**AAEh/O**) Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo. (**AMG/NF/Cg**) Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleicos *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*. (**AMEh/O**) Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico)*. (**ABGt**) Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo tiomórfico. (**ABG/NF/Cg**) Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*. (**BNQn**) Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico; Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico e Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico hidromórficos)*. (**CHG**) Cultivo graminóide *(legenda mista com presença de Pastagem; Formação Herbácea secundária inicial e Formação Arbustiva secundária inicial)*. (**CHNG**) Cultivo não graminóide. (**HO/NF/G**) Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo. (**HGtB**) Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – marismas e brejos de maré *(legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Gleissolo tiomórfico)*. (**HGtC**) Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – zona de *Cladium (legenda mista com presença de Solo Exposto)*. (**CA**) Cultivo arbóreo. (**ABO**) Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo. (**ABEn**) Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico. (**AMGt**) Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico. (**AMEn**) Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo)*. (**BO/NF/G**) Formação Arbustiva sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo. (**AAC**) Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo.

Este conjunto de resultados acima demonstrados parecem indicar que o classificador RNA, baseado em modelo conexionista de aprendizado de máquina, apresenta-se como melhor alternativa para o mapeamento da distribuição de sistemas vegetacionais, quando comparado aos algoritmos tradicionais de base linear.

De fato, conforme já destacado por Atkinson e Tatnall (1997), as RNAs são transformações de dados essencialmente flexíveis que não estão restritas a assunções subjacentes e que, no caso de um particionamento complexo do espaço de classificação, podem considerar efeitos não-lineares. Do mesmo modo, esta flexibilidade das RNAs pode também ser adequada para trabalhar com efeitos de ruído presentes nos conjuntos de dados espectrais. Neste sentido, os resultados acima parecem concordar com aqueles reportados na literatura onde RNAs são apontadas como instrumentos mais eficientes do que classificadores tradicionais para apreender a complexidade das assinaturas espectrais de coberturas arbóreas (FOODY e ARORA, 1997; ATKINSON e TATNALL, 1997). Alinham-se também com as indicações de que as RNAs são provavelmente mais capacitadas a classificar feições minoritárias, adaptando-se a influências variadas de diferenças no dossel arbóreo e levando em conta efeitos não-lineares da vegetação de sub-bosque e do substrato (LINDERMAN *et al*., 2004).

4.6.3. CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DA COBERTURA DO SOLO PARA A REGIÃO LITORÂNEA SUL-SUDESTE

Tendo em vista que o algoritmo de Rede Neural Artificial demonstrou melhor desempenho na etapa seletiva anterior, procedimentos de classificação digital das imagens Landsat-7/ETM+ desenvolvidos com este classificador foram aplicados às três cenas que cobrem a região do litoral norte de SC ao sul de São Paulo.

Nesta etapa foram utilizadas como varáveis de saída as 23 categorias descritas anteriormente, enquanto que para as variáveis de entrada utilizou-se nove imagens, constituídas pelas seis bandas originais Landsat-7/ETM+ (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) e pelas três bandas da transformação Tasseled Cap (bandas brilho, verdor e umidade). A opção pelo uso das três bandas Tasseled Cap ao invés da imagem NDVI deve-se ao fato de que, durante a etapa de realce de imagens e seleção de amostras de treinamento, a composição colorida RGB-VBU (verdor, brilho e umidade) apresentou-se nitidamente superior como substrato de discriminação de classes quando comparada à imagem NDVI.

4.6.3.1. Treinamento das redes

Definidas as variáveis de entrada e saída, seguiu-se uma fase de treinamento da Rede Neural Artificial, implementada com um algoritmo de aprendizagem do tipo perceptron multicamadas com retropropagação ("back-propagation" - BP).

No processo de treinamento de redes, os parâmetros de controle sobre a amostragem, a arquitetura da rede, o processo de aprendizado e os limiares de conclusão do treinamento foram variados até atingir a melhor sintonia, ao mesmo tempo em que se monitorava a ocorrência de sobretreinamento. Nesta etapa fundamental da aplicação de RNAs os procedimentos de treinamento de redes para a classificação de cobertura do solo da região do litoral sul-sudeste exigiram 147 experimentos até a obtenção de uma rede com acurácia de treinamento de 84%. O processo de treinamento das redes foi bastante oneroso em termos de tempo de processamento, uma vez que a duração média de cada experimento foi de cerca de 30 minutos, em uma configuração de máquina com 1 Gb de memória RAM e processador Pentium4 3.06 GHz.

A rede selecionada ao final do processo de treinamento apresentou a seguinte configuração em termos de arquitetura e parâmetros associados ao aprendizado:

N° nós de entrada (variáveis de entrada): nove, sendo seis bandas (1; 2; 3; 4; 5; 7) do sensor Landsat 7 ETM+ mais três superfícies transformadas do índice de vegetação Tassled Cap (greeness; wetness; brigthness)
N° nós de saída (variáveis de saída): 23 classes de cobertura do solo
N° pixeis de treinamento/teste: 55/55
N° nós na camada escondida: 16
Constante a da função sigmóide: 16.91
Taxa de aprendizado: 0.04
Fator momentum: 0.65
Erro aceitável (RMS): 0.0002
N° máximo de iterações: 20000
Taxa de acurácia mínima: 84%

Ao final do treinamento, as seguintes estatísticas foram obtidas:

RMS de treinamento: 0.00063
RMS de teste: 0.00064
Taxa de acurácia: 84.03%
N° iterações: 18.257
Sobretreinamento: nenhum

4.6.3.2. Classificação e mapeamento da cobertura do solo

A Rede Neural Artificial, treinada e selecionada conforme descrito acima, foi então acionada para gerar a classificação de cobertura do solo do litoral norte de SC ao sul de SP, resultando no produto apresentado na figura 4.15.

O desempenho da classificação pode ser avaliado a partir da matriz representada na tabela 4.13.

Ao nível geral o mapeamento alcançou um índice Kappa global de 0,96, que segundo a classificação de LANDIS e KOCH (1977) pode ser considerado excelente.

De acordo com estes autores, também ao nível das categorias os valores de Kappa corresponderam a um resultado excelente para todas as classes, com exceção da categoria Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo (AAC) que alcançou um Kappa compatível com resultado de muito bom a excelente.

Deste cruzamento efetuado com os 2471 pontos de avaliação, o mapeamento apresentou uma porcentagem de acerto igual ou superior a 80% em todas as 23 classes, sendo que o acerto médio situou-se em 92,93%.

A melhora de desempenho desta classificação em relação à efetuada na etapa de seleção dos algoritmos em boa parte resulta do extenso processo de treinamento das redes, mas também reflete a melhoria obtida na discriminação dos padrões de vegetação resultante da utilização das bandas Tasseled Cap como variáveis de entrada.

Figura 4.15. Mapa de distribuição dos ecossistemas do quaternário costeiro do litoral norte de SC ao sul de SP

750000 800000 850000 900000

7300000 7250000 7200000 7150000 7100000

SP

PR

SC

Ilha Comprida

Ilha do Cardoso

Ilha de Superagüi

Baía de Paranaguá

Baía de Guaratuba

Baía de São Francisco

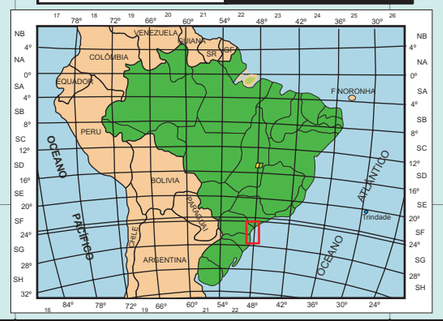
N

W E

S

Sistema de Projeção Cartográfica: UTM
Elipsóide: SAD69
Datum: SAD69

0 25.000 50.000 m



Legenda

- AAC - Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo (legenda mista com presença de Formação Arbórea Média secundária intermediária; Formação Arbórea Baixa secundária intermediária)
- AAEh/O - Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo
- AAEn - Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico
- ABEn - Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico
- ABG/NF/Cg - Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico (legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermadiária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)
- ABGt - Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo Tiomórfico
- ABO - Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo
- ABS - Formação Arbórea Baixa secundária intermediária
- AMEh/O - Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo (legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico)
- AMEn - Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico (legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo)
- AMG/NF/Cg - Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico (legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)
- AMGt - Formação Arbórea Média sobre Gleissolo Tiomórfico
- AMS - Formação Arbórea Média secundária intermediária
- BNQn - Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico (legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico ; Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórficos e Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico)
- BO/NF/G - Formação Arbustiva sobre Organossolo Neossolo Flúvico ou Gleissolo
- CA - Cultivo Arbóreo
- CHG - Cultivo graminóide (legenda mista com presença de Pastagem; Formação Herbácea secundária inicial e Formação Arbustiva secundária inicial)
- CHNG - Cultivo não graminóide
- HGt - Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico - brejo de maré (legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Gleissolo tiomórfico)
- HGtC - Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico - zona de *Cladium* (legenda mista com presença de Solo Exposto)
- HO/NF/G - Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo
- STNV - Superfície terrestre não-vegetada (Área urbana em legenda mista com presença de Solo Exposto; Estruturas lineares e Praia)
- Área fora da análise
- SL - Superfície Líquida
- Limite Estadual

Título

Mapa de Distribuição dos Ecossistemas do Quaternário Costeiro do Litoral Norte de Santa Catarina ao Sul de São Paulo

Instituição

Programa de Pós-Graduação em Geografia
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Sistema

VistaSAGA - UFRJ
Sistema de Análise Geo-Ambiental

Autor(a)

Maria Lucia Lorini

Apoio

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CAPES

PETROBRAS

Tabela 4.13. Matrix de acurácia da classificação efetuada com o algoritmo de rede neural artificial sobre as bandas Landsat 7/ETM+ (1,2,3,4,5,7 + brilho, verdor e umidade da trans formação Tasseled Cap).

Tabela 4.3. Matriz de acurácia da clasificação efetuada com o algoritmo de rede neural artificial sobre as bandas 1,2,3,4,5,7 e as bandas brilho, verdor e umidade da transformação Tassled Cap. Os acertos são apresentados em porcentagem, os erros de omissão ou exclusão e de comissão ou inclusão, bem como o Índice de Concordância Kappa, estão representados entre 0 e 1.

CLASSES	AAEn	ABS	AMS	SL	STNV	AAEh/O	AMG/NF/Cg	AMEh/O	ABGt	ABG/NF/Cg	BNQn	CHG	CHNG	HO/NF/G	HGtB	HGtC	CA	ABO	ABEn	AMGt	AMEn	BO/NF/G	AAC	*COMISSÃO*	*KAPPA*
AAEn	**98.32**	0.00	0.00	0.00	0.00	7.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.33	0.00	0.00	*0.02*	*0.98*
ABS	0.00	**82.14**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.05*	*0.82*
AMS	0.00	1.19	**94.44**	0.00	0.00	0.00	4.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.38	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.08*	*0.94*
SL	0.00	0.00	0.00	**99.85**	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.11	0.00	0.00	0.00	*0.01*	*1.00*
STNV	0.00	0.00	0.00	0.00	**99.73**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.85	0.00	0.00	0.00	0.00	3.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.04*	*0.99*
AAEh/O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**92.86**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.97	0.00	0.00	0.00	1.67	0.00	0.00	*0.28*	*0.93*
AMG/NF/Cg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**91.30**	2.17	0.00	3.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.09*	*0.91*
AMEh/O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**95.66**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.04*	*0.96*
ABGt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**92.68**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.00*	*0.93*
ABG/NF/Cg	0.00	1.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.17	0.00	**89.65**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.38	0.00	0.00	0.00	20.00	*0.16*	*0.90*
BNQn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**94.05**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.00*	*0.93*
CHG	0.00	1.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.75	**95.00**	0.00	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.16*	*0.95*
CHNG	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	**90.91**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.23*	*0.91*
HO/NF/G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	**99.06**	0.00	4.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.04*	*0.99*
HGtB	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	4.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**93.75**	3.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.07*	*0.94*
HGtC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	**89.90**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.01*	*0.90*
CA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**94.03**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.00*	*0.94*
ABO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**96.8**	0.00	0.00	0.00	6.67	0.00	*0.01*	*0.97*
ABEn	0.00	0.00	5.56	0.00	0.00	0.00	4.35	0.00	0.00	3.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**90.48**	0.00	0.00	0.00	0.00	*0.10*	*0.90*
AMGt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**88.89**	0.00	0.00	0.00	*0.11*	*0.89*
AMEn	1.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**95.00**	0.00	0.00	*0.03*	*0.95*
BO/NF/G	0.00	2.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00	0.00	**93.33**	0.00	*0.22*	*0.93*
AAC	0.00	9.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**80.00**	*0.50*	*0.80*
OMISSÃO	*0.02*	*0.18*	*0.06*	*0.00*	*0.00*	*0.07*	*0.09*	*0.04*	*0.07*	*0.10*	*0.06*	*0.05*	*0.09*	*0.06*	*0.10*	*0.06*	*0.03*	*0.03*	*0.10*	*0.11*	*0.05*	*0.07*	*0.20*		
GERAL																									***0.96***

Legenda das classes: **AAEn**) Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico. **ABS**) Formação Arbórea Baixa secundária intermediária. **AMS**) Formação Arbórea Média secundária intermediária. **SL**) Superfície líquida. **STNV**) Superfície terrestre não-vegetada *(Área urbana em legenda mista com presença de Solo Exposto; Estruturas lineares e Praia)*. **AAEh/O**) Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo. **AMG/NF/Cg**) Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleicos *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*. **AMEh/O**) Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico)*. **ABGt**) Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo tiomórfico. **ABG/NF/Cg**) Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*. (**BNQn**) Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico; Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico e Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico hidromórficos)*. **CHG**) Cultivo graminóide *(legenda mista com presença de Pastagem; Formação Herbácea secundária inicial e Formação Arbustiva secundária inicial)*. (**CHNG**) Cultivo não graminóide. **HO/NF/G**) Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo. (**HGtB**) Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – brejo de maré *(legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Gleissolo tiomórfico)*. (**HGtC**) Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – zona de *Cladium (legenda mista com presença de Solo Exposto)*. (**CA**) Cultivo arbóreo. (**ABO**) Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo. (**ABEn**) Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico. (**AMGt**) Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico. (**AMEn**) Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo)*. **BO/NF/G**) Formação Arbustiva sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo. (**AAC**) Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Média secundária intermediária; Formação Arbórea Baixa secundária intermediária)*.

4.6.3.3. Planimetrias do mapeamento

A partir do mapeamento gerado foram calculadas as áreas correspondentes a cada uma das categorias de coberturas terrestres em superfícies quaternárias da região litorânea do norte de SC ao sul de SP, que constituíram ecocomplexos de 1ª e 2ª ordem.

Como pode ser observado na tabela 4.14, a região apresenta um predomínio de formações naturais e seminaturais, as quais ainda ocupam 81,45% dos terrenos quaternários, enquanto que as áreas antrópicas mapeadas recobrem 18,55% da superfície total.

Dentre as áreas não antrópicas, a maior parte é constituída por coberturas arbóreas que ocupam 70.52% dos terrenos, onde os dois grupos de formações com maior expressão espacial correspondem a coberturas que se desenvolvem sobre Espodossolos e Organossolos (27,22%) e sobre Cambissolos, Gleissolos não-tiomórficos e Neossolos Flúvicos (28,07%). A grosso modo, no primeiro grupo destacam-se as vegetações de Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas e Formações Pioneiras Arbóreas de Influência Marinha, enquanto que no segundo figuram a Floresta Ombrófila Densa Aluvial e as Formações Pioneiras Arbóreas de Influência Fluvial. Embora este último grupo apresente uma extensão geográfica significativa, estas formações encontram-se bastante interferidas e via de regra ocorrem em mosaicos com formações secundárias intermediárias, sendo que os ecótopos em melhor estado de conservação estão praticamente restritos a locais de difícil acesso. Já a porção recoberta inteiramente por formações secundárias intermediárias (capoeiras Fase IV), representa 9,94% da superfície total, uma área bem superior aos 5,29% ocupados pelas formações halófitas dos Gleissolos tiomórficos, que compreendem as Áreas de Formações Pioneiras Arbóreas de Influência Fluviomarinha, os manguezais.

Em conjunto, as coberturas arbustivas e herbáceas estão distribuídas sobre 10,93% dos terrenos, sendo que as maiores expressões em área são apresentadas pelas vegetações sobre Gleissolos não-tiomórficos, Neossolos Flúvicos e Organossolos, correspondentes às Áreas de

Formações Pioneiras de Influência Fluvial, as vegetações de várzea, que somam 7,51%. Em seguida figuram as vegetações sobre Gleissolo tiomórfico (2,97%), os marismas, brejos de maré e apicuns das Áreas de Formações Pioneiras de Influência Fluviomarinha. Por último aparecem as coberturas sobre Neossolos Quartzarênicos, as vegetações de restinga propriamente ditas das Áreas de Formações Pioneiras Arbóreas de Influência Marinha, restritas a 0,45% da região.

No grupo das áreas antrópicas a maior extensão geográfica corresponde a áreas agropecuárias, que cobrem 14,35% dos terrenos, ao passo que 4,20% da superfície regional consiste de coberturas não-vegetadas associadas sobretudo à ocupação urbana. A maior porção das áreas rurais está representada por cultivos graminóides, onde 9,46% constituem pricipalmente áreas de forrageiras para bubalinocultura e bovinocultura, bem como áreas de rizicultura. Outros 4,54% do recorte territorial encontram-se cobertos por cultivos não-graminóides, sobretudo por áreas de bananicultura.

Desta distribuição resulta que, de modo geral, as paisagens na região do litoral norte de SC ao sul de SP ainda exibem configurações onde a matriz está composta sobretudo por formações florestais, enquanto as manchas incidentes estão constituídas por áreas antrópicas.

Partindo desta janela de maior detalhe, a etapa subseqüente deste estudo segue para uma visão sinóptica do sistema de coberturas arbóreas do quaternário costeiro ao longo de todo o bioma da Mata Atlântica.

Tabela 4.14. Planimetria das classes de cobertura dos terrenos quaternários costeiros do norte de SC ao sul de SP.

CLASSES	***ÁREA (ha)***	***ÁREA(%)***
AAC - Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Média secundária intermediária; Formação Arbórea Baixa secundária intermediária)*	39010.68	8.19
AAEh/O - Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo	1839.24	0.38
AAEn - Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico	38962.44	8.18
ABEn - Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico	14506.20	3.05
ABG/NF/Cg - Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*	66136.68	13.88
ABGt - Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo tiomórfico	7657.56	1.60
ABO - Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo	18355.68	3.90
ABS - Formação Arbórea Baixa secundária intermediária	28758.60	6.04
AMEh/O - Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico)*	40004.28	8.40
AMEn - Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo)*	15768.36	3.31
AMG/NF/Cg - Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*	28597.32	6.00
AMGt - Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico	17579.16	3.69
MAS - Formação Arbórea Média secundária intermediária	18579.24	3.90
BNQn - Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico; Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico e Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico)*	2127.60	0.45
BO/NF/G - Formação Arbustiva sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo	30041.28	6.31
HGtB - Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – marismas e brejos de maré *(legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Gleissolo tiomórfico)*	13529.88	2.81
HGtC - Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – zona de *Cladium (legenda mista com presença de Solo Exposto)*	766.44	0.16
HO/NF/G - Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo	5711.04	1.20

CA - Cultivo arbóreo	1665.72	0.35
CHG - Cultivo graminóide *(legenda mista com presença de Pastagem; Formação Herbácea secundária inicial e Formação Arbustiva secundária inicial)*	45091.44	9.46
CHNG - Cultivo não graminóide.	21603.24	4.54
STNV - Superfície terrestre não-vegetada *(Área urbana em legenda mista com presença de Solo Exposto; Estruturas lineares e Praia)*	20006.28	4.20
TOTAL	***476298.36***	***100.00***

4.6.4. CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO SOLO PARA A REGIÃO DO LITORAL LESTE DO BRASIL

Nesta etapa foi realizada a classificação digital dos produtos MODIS, através do classificador de Rede Neural Artificial, com vistas a efetuar o mapeamento da cobertura do solo no recorte da área de estudo que compreende a faixa litorânea do Brasil oriental.

As variáveis de entrada empregadas nesta classificação foram constituídas pelas três imagens de campo contínuo (bandas tree, herb e bare) derivadas das bandas terrestres 1 a 7 do sensor MODIS. Como variáveis de saída foram tomadas três categorias, *cobertura arbórea*, *cobertura não-arbórea e/ou superfície terrestre não-vegetada* e *superfície líquida*.

4.6.4.1. Treinamento das redes

Partindo destas variáveis de entrada e saída, realizou-se o processo de treinamento da Rede Neural Artificial, implementada com um algoritmo de aprendizagem do tipo perceptron multicamadas com retropropagação (“back-propagation” - BP).

Os procedimentos de treinamento das redes destinadas a analisar os produtos MODIS demandaram 52 experimentos até a obtenção de uma rede com acurácia de treinamento de 90%. Embora ainda bastante exigente em termos de tempo dispendido, o treinamento desta rede foi mais ágil que o daquela dirigida à classificação da região litorânea entre o norte de

SC e o sul de SP. Provavelmente este menor número de experimentos, em comparação aos 152 requeridos para treinar a rede anterior, deva-se à adoção de um número também menor de variáveis de entrada (3 ao invés de 9) e de saída (3 ao invés de 23) para esta classificação.

A rede que foi selecionada ao final deste processo de treinamento apresentou as seguintes configurações de arquitetura e parâmetros de monitoração:

N° nós de entrada (variáveis de entrada): três bandas MODIS processadas como campos contínuos (bare; herb; tree)
N° nós de saída (variáveis de saída): três classes de cobertura do solo
N° pixeis de treinamento/teste: 130/130
N° nós na camada escondida: 4
Constante a da função sigmóide: 20.85
Taxa de aprendizado: 0.04
Fator momentum: 0.65
Erro aceitável (RMS): 0.00005
N° máximo de iterações: 5000
Taxa de acurácia mínima: 90%

Após o treinamento, resultaram as seguintes estatísticas finais:

RMS de treinamento: 0.007743
RMS de teste: 0.007103
Taxa de acurácia: 90%
N° iterações: 1418
Sobretreinamento: nenhum

4.6.4.2. Classificação e mapeamento da cobertura do solo

A Rede Neural Artificial treinada com as configurações acima mencionadas foi ativada para produzir o mapeamento da cobertura do solo no recorte da área de estudo que

compreende a faixa litorânea do leste do Brasil. O resultado desta classificação consiste no mapeamento apresentado na figura 4.16.

O desempenho do produto gerado por esta classificação pode ser avaliado pelo exame da tabela 4.15.

Tabela 4.15. Matriz de acurácia da clasificação efetuada com o algoritmo de rede neural artificial sobre as bandas MODIS de campo contínuo (bare, herb, tree). Os acertos são apresentados em porcentagem, os erros de omissão ou exclusão e de comissão ou inclusão, bem como o Índice de Concordância Kappa, estão representados entre 0 e 1.

CLASSES	**Cobertura arbórea**	**Cob. não-arbórea e/ou não-vegetada**	**Superfície líquida**	***COMISSÃO***	***KAPPA***
Cobertura arbórea	**97.22**	3.30	7.69	*0.03*	*0.94*
Cob. não-arbórea e/ou não-vegetada	2.78	**91.98**	15.39	*0.05*	*0.85*
Superfície líquida	0.00	4.72	**76.92**	*0.09*	*0.80*
OMISSÃO	*0.03*	*0.09*	*0.23*		*0.32*
GERAL					***0.88***

Em nível geral, o produto atingiu um valor de Kappa global de 0,88, que de acordo com a classificação de LANDIS e KOCH (1977) corresponde a um resultado de mapeamento excelente.

Segundo estes autores, ao nível das categorias os valores de Kappa alcançados pelo mapeamento corresponderam a um resultado excelente para as classes de cobertura terrestres (*arbórea* e *não-arbórea e/ou não-vegetada*). Para a categoria *Superfície líquida* o valor de Kappa corresponde a um resultado de muito bom a excelente.

O cruzamento de concordância realizado entre o mapa classificado e os 529 pontos de avaliação demonstrou que o produto atingiu uma porcentagem de acerto superior a 90% para

as coberturas terrestres (acerto médio de 94,6%) e maior que 75% para a superfície líquida, sendo que a média de acerto geral situou-se em 88,71%.

Cabe destacar que o menor desempenho observado na classe superfície líquida deveu-se sobretudo à grande diferença de resolução espacial entre as fontes que originaram o mapeamento (imagens MODIS com *pixel* de 500m) e as que basearam os pontos de avaliação (imagens IKONOS com *pixel* de 4m), um problema que se tornou mais crítico nas imediações da linha de costa.

Figura 4.16. Mapa de distribuição dos ecossistemas arbóreos do quaternário costeiro da Mata Atlântica.

50°0'0"W

40°0'0"W

10°0'0"S

20°0'0"S

30°0'0"S

Teresina

Natal

João Pessoa

Recife

Palmas

Maceió

Aracaju

Salvador

Cuiabá

Brasília

Goiania

Belo Horizonte

Vitória

Campo Grande

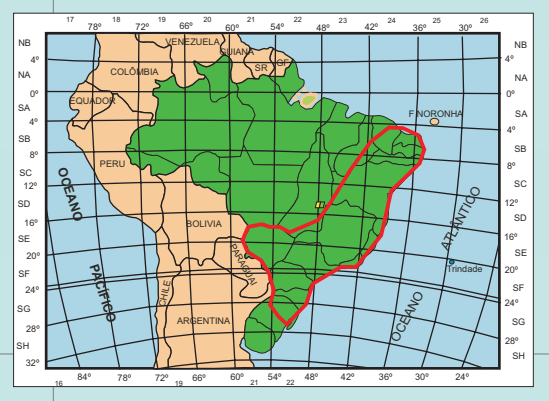
São Paulo

Rio de Janeiro

Curitiba

Florianópolis

Porto Alegre



Legenda

- Ecossitemas arbóreos sobre coberturas quaternárias costeiras no Domínio da Mata Atlântica (ano de 2001)
- Ecossitemas arbóreos sobre coberturas quaternárias costeiras no Domínio da Mata Atlântica (época pré-colonização européia)
- Coberturas cenozóicas quaternárias no Domínio da Mata Atlântica
- Coberturas cenozóicas terciárias no Domínio da Mata Atlântica
- Coberturas pré-cenozóicas no Domínio da Mata Atlântica
- Área fora do Domínio da Mata Atlântica
- SL - Superfície líquida
- Limite do Brasil
- Limite Estadual
- Capitais

N W E S

Sistema de Projeção Cartográfica: Policônica
Elipsóide: UGG167
Datum: SAD69

Produto obtido através de classificação de imagens derivadas do sensor MODIS, ano base 2001.

0 250 500

Km

Título

Mapa de Distribuição dos Ecossistemas Arbóreos do Quaternário Costeiro da Mata Atlântica

Instituição

Programa de Pós-Graduação em Geografia
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Sistema

VistaSAGA - UFRJ
Sistema de Análise Geo-Ambiental

Autor(a)

Maria Lucia Lorini

Apoio

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CAPES
BR PETROBRAS

4.6.4.3. Planimetrias do mapeamento

A partir do mapa final produzido pela classificação foram calculadas as áreas correspondentes a cada categoria de cobertura terrestre em superfícies quaternárias da região litorânea do leste do Brasil, as quais constituem ecocomplexos de 2ª ordem.

Examinando a tabela 4.16 percebe-se que apenas uma pequena porção de pouco mais de 10% dos terrrenos quaternários costeiros encontra-se ocupada por sistemas arbóreos, sendo que os quase 90% restantes apresentam-se desprovidos de vegetação ou cobertos por formações herbáceas ou arbustivas.

Tabela 4.16. Planimetria das classes de cobertura dos terrenos quaternários costeiros do leste do Brasil.

CLASSES	*ÁREA (ha)*	*ÁREA (%)*
Cobertura arbórea	698384.99	12.22
Cobertura não-arbórea e/ou não-vegetada	5016183.28	87.78
TOTAL	***5714568.27***	***100.00***

Ao contrário da situação encontrada no recorte do litoral norte de SC a sul de SP, onde a maior parte da região apresenta cobertura arbórea, a paisagem predominante do sistema de coberturas arbóreas quaternárias ao longo da costa leste do Brasil exibe uma configuração onde a matriz está constituída por superfícies não-vegetadas ou não-arbóreas. Nestas paisagens os elementos que correspondem aos remanescentes de sistemas arbóreos são as manchas que incidem sobre a matriz.

Para buscar subsídios que auxiliem a entender se estas proporções refletem um panorama natural de distribuição de atributos ambientais ou representam o resultado da ocupação antrópica, analisa-se a seguir o resultado da monitoria entre a situação de 2001 e o cenário retrospectivo.

4.6.5. MONITORIA DOS ECOCOMPLEXOS ARBÓREOS ENTRE A SITUAÇÃO PRETÉRITA E 2001

A análise de monitoria realizada comparou a distribuição dos ecocomplexos arbóreos no recorte territorial das superfícies quaternárias da costa leste do Brasil em dois recortes temporais: uma situação pretérita (t_1), representada pelo cenário retrospectivo construído para simular a época pré-colonização européia e uma situação atual (t_2), constituída pelo mapeamento dos ecocomplexos em 2001.

Os resultados do cruzamento destes dois mapas demonstram que da área ocupada por ecocomplexos arbóreos na situação original em (t_1), que somava 3225731,32 ha, apenas uma porção equivalente a 21,65% (698384,99 ha) permaneceu nesta categoria em 2001 (t_2). De fato, a maior parte desta área (78,26%), um total de 2524971,73 ha, deixou de ser caracterizada como cobertura arbórea.

Ao nível regional estas transformações correspondem a maiores perdas e menores permanências de cobertura arbórea nas regiões nordeste, seguida do sudeste e por último da região sul do país (ver tabela 4.17).

Tabela 4.17. Distribuição regional das perdas e permanências de coberturas arbóreas quaternárias costeiras, entre as situações pretérita (pré-colonização européia) e atual (2001).

	Deixou de ser arbórea % (ha)	***Permaneceu arbórea % (ha)***
Nordeste	***38.06 (961572.43)***	***15.07 (105246.2)***
BA	17.52 (442371.81)	14.30 (99829.13)
SE	5.67 (143085.05)	0.09 (661.25)
AL	4.43 (111967.49)	0.11 (763.68)
PE	3.67 (93086.51)	0.19 (1334.72)
PB	3.54 (89313.19)	0.12 (867.54)
RN	2.74 (69306.12)	0.16 (1091.70)
CE	0.49 (12442.26)	0.02 (149.60)
PI	-	0.08 (548.58)
Sudeste	***32.12 (810520.76)***	***38.15 (266420.53)***
RJ	13.70 (345888.07)	1.70 (11885.87)
ES	13.01 (328409.32)	4.63 (32311.40)
SP	5.39 (136223.37)	31.82 (222223.26)
Sul	***29.82 (752878.54)***	***46.78 (326670.32)***
SC	22.71 (573486.26)	15.93 (111256.60)
RS	5.31 (134003.48)	7.30 (50985.24)
PR	1.80 (45388.80)	23.55 (164428.48)
TOTAL	***100 (2524971.73)***	***100 (698337.05)***

Em termos mais gerais, os resultados exibidos na tabela 4.18 indicam que a distribuição original dos ecocomplexos arbóreos abrangia mais da metade da região estudada (56,45%), o que constitui uma cobertura arbórea bem maior que a detectada em 2001 (12,22%).

Tabela 4.18. Área de distribuição total dos ecocomplexos arbóreos do quaternário litorâneo brasileiro, entre as situações pretérita (pré-colonização européia) e atual (2001).

	SITUAÇÃO PRETÉRITA		***SITUAÇÃO ATUAL***	
CLASSES	***Área (ha)***	***Área (%)***	***Área (ha)***	***Área (%)***
Cobertura arbórea	3225731.32	56.45	698384.99	12.22
Cobertura não-arbórea e/ou não-vegetada	2488836.95	43.55	5016183.28	87.78
TOTAL	***5714568.27***	***100.00***	***5714568.27***	***100.00***

Neste ponto cumpre ressaltar que as planimetrias resultantes da monitoria acima referida basearam-se em comparação com um cenário retrospectivo hipotético, de modo que, embora estejam apresentados com duas casas decimais, estes valores não têm o objetivo de constituir computações areais precisas, mas sim de fornecer um tabela geral da situação das áreas em análise.

Quanto à análise da distribuição dos ecocomplexos arbóreos em relação à freqüência de manchas em cada uma das doze classes de tamanho discretizadas (ver tabela 4.19), os resultados revelam que, tanto na situação atual quanto na retrospectiva, a maioria dos componentes dos sistemas quaternários costeiros apresenta dimensões entre 20 e 500 ha.

Contudo, observa-se em 2001 uma nítida tendência de aumento na proporção das manchas encontradas nos quatro grupos de menor tamanho (de 20 a 200 ha), enquanto no sentido inverso constata-se um decréscimo na porcentagem dos componentes nas classes acima de 200 ha.

Este quadro é ainda mais contundente quando se compara o número absoluto de componentes, tendo em vista que na situação atual este valor mais do que duplicou em relação à situação pretérita, sendo que estas manchas agora totalizam uma área quase cinco vezes menor que a original.

Tabela 4.19. Distribuição dos ecocomplexos arbóreos segundo as classes de tamanho das manchas, entre as situações pretérita (pré-colonização européia) e atual (2001).

	SITUAÇÃO PRETÉRITA		***SITUAÇÃO ATUAL***	
VARIÁVEIS	***componentes***	***porcentagem***	***componentes***	***porcentagem***
1) > 20 - 25 ha	493	41.32	1322	47.22
2) > 25 - 50 ha	162	13.58	476	17
3) > 50 - 100 ha	131	10.98	387	13.82
4) > 100 - 200 ha	89	7.46	284	10.14
5) > 200 - 500 ha	94	7.88	195	6.96
6) > 500 - 1000 ha	53	4.44	65	2.32
7) > 1000 - 2000 ha	37	3.10	33	1.18
8) > 2000 - 5000 ha	49	4.11	21	0.75
9) > 5000 - 10000 ha	31	2.60	7	0.25
10) > 10000 - 20000 ha	22	1.84	3	0.11
11) > 20000 - 50000 ha	17	1.43	6	0.21
12) > 50000 ha	15	1.26	1	0.04
TOTAL	***1193***	***100***	***2800***	***100***

De fato, como pode ser observado no mapa da figura 4.16, bem como na tabela 4.17, na situação atual apenas a região do litoral sul de São Paulo ao norte de Santa Catarina, no trecho compreendido entre São Sebastião (SP) e Joinville (SC), ainda permanece com boa cobertura arbórea. Do mesmo modo, é também neste setor da faixa costeira quaternária que se encontram praticamente todos os ecocomplexos arbóreos com mais de 1000 ha.

Todos os resultados das planimetrias diretas da monitoria, que compara os dois cortes temporais representados pelo cenário retrospectivo pré-colonização européia e pelo mapeamento do ano de 2001, apontam claramente o aumento da fragmentação do sistema analisado, indicando que a distribuição atual dos ecocomplexos arbóreos do quaternário costeiro do Brasil oriental reflete sobretudo o impacto da ocupação antrópica.

4.6.6. ANÁLISE DAS MEDIDAS DESCRITORAS DE PADRÃO ESPACIAL

Além das planimetrias diretas, o exame dos índices descritores de paisagem também atesta mudanças significativas na distribuição dos ecocomplexos arbóreos litorâneos (ver tabela 4.20), considerando o corte temporal da época pré-colonização européia para a situação no início do século XXI.

Tabela 4.20. Índices de paisagem descritores dos sistemas arbóreos quaternários costeiros. Teste U de Mann Whitney para comparação entre as situações pretérita (pré-colonização européia) e atual (2001).

	SITUAÇÃO PRETÉRITA (n=1193)		*SITUAÇÃO ATUAL (n=2800)*				
VARIÁVEIS	***média***	***erro padrão***	***média***	***erro padrão***	***p***	***U***	***Z***
Área (ha)	3253.62	516.03	253.55	43.12	*0.0000*	636450.5	24.4093
Perímetro (m)	43826.43	5237.71	6822.40	519.25	*0.0000*	646961.0	24.0474
Índice de Compactação (IC)	0.0060	0.0001	0.0077	0.0001	*0.0000*	797453.0	-18.8660
Índice de Fragmentação (IF)	0.04	0.0006	0.06	0.0001	*0.0000*	1073393	9.3653
Dimensão Fractal (DF)	2.81	0.0126	2.48	0.0094	*0.0287*	1281853	-2.1880
Diversidade Geológica (Hg)	0.40	0.0076	0.34	0.0028	*0.0000*	1053011	10.0670
Diversidade Vegetacional (Hv)	0.39	0.0071	0.32	0.0028	*0.0000*	1042185	10.4398

Estas mudanças envolvendo as manchas arbóreas componentes do sistema quaternário costeiro consistem em tendências decrescentes nos parâmetros geométricos de área, perímetro e dimensão fractal. Em relação a t_1, os valores atuais apresentaram um expressivo decréscimo de mais de doze vezes para a área média das manchas; de mais de seis vezes para o perímetro e uma diminuição na dimensão fractal de 2,81 para 2,48. Ao mesmo tempo em que o número de componentes aumentou de 1193 para 2800, constatou-se a redução do tamanho médio das unidades, uma clássica combinação indicadora do processo de fragmentação do sistema.

Neste mesmo sentido, a redução dos valores da dimensão fractal sugere o aumento de áreas de atividades antrópicas, que impõem limites mais simplificados às bordas da floresta, conforme já registrado na literatura (MILLINGTON, VELEZ-LIENDO e BRADLEY, 2003).

Consonante com os resultados anteriormente descritos, também foi identificada uma tendência de acréscimo para o índice de fragmentação (IF). Por outro lado, registrou-se um pequeno aumento no índice de compactação (IC) das manchas, o que pareceria destoar do padrão encontrado para as demais medidas. Contudo, os valores um pouco superiores no IC das manchas em 2001 são reflexo do maior número de elementos com pequenas dimensões, cuja extensão geográfica restringe-se a poucos *pixels*, o que produz um efeito de manchas compactas.

No que se refere aos parâmetros de diversidade, observa-se que estes também sofreram declínio, sendo que os índices H, tanto os calculados para as 21 classes de coberturas geológicas de possível ocorrência nas manchas, assim como aqueles baseados nas 19 classes de vegetação, ambos decresceram de valores em torno de 0,4 para outros próximos de 0,3.

Em síntese, todos estes resultados convergem para apontar uma mudança espacial com tendência de perda em termos de extensão geográfica, de conectividade e de diversidade para o sistema em análise.

4.6.7. ANÁLISE DE LACUNAS DE CONSERVAÇÃO ("GAP ANALYSIS")

A Análise de Lacunas demonstrou que, dentro do sistema federal de unidades de conservação, apenas 4,75% das áreas atualmente ocupadas por ecocomplexos arbóreos no quaternário costeiro do leste do Brasil encontram-se protegidas, ou seja, situam-se em unidades de conservação de proteção integral (tab. 4.21).

Tabela 4.21. Distribuição das áreas de cobertura de ecocomplexos arbóreos do quaternário costeiro em relação ao sistema federal de unidades de conservação.

	Área em coberura arbórea % (ha)	***Área em UCs de Proteção Integral % (ha)***	***Área em UCs de Uso Sustentável % (ha)***
Nordeste	*15.06 (105221.49)*	*1.01 (336.73)*	*1.39 (1678.64)*
BA	14.29 (99829.13)	1.01 (336.73)	0.30 (365.25)
SE	0.09 (661.25)	-	-
AL	0.11 (763.68)	-	0.31 (369.61)
PE	0.19 (1310.01)	-	-
PB	0.12 (867.54)	-	0.53 (644.55)
RN	0.16 (1091.70)	-	-
CE	0.02 (149.60)	-	-
PI	0.08 (548.58)	-	0.25 (299.23)
Sudeste	*53.02 (266420.53)*	*12.37 (4105.72)*	*62.92 (76097.94)*
RJ	1.70 (11885.87)	3.13 (1037.40)	3.69 (4468.44)
ES	4.63 (32311.40)	9.24 (3068.32)	0.88 (1061.79)
SP	31.82 (222223.26)	-	58.35 (70567.71)
Sul	*31.92 (326742.97)*	*86.61 (28753.31)*	*35.69 (43159.56)*
SC	14.87 (103832.59)	1.06 (352.98)	0.55 (659.79)
RS	7.30 (50985.24)	6.79 (2254.41)	-
PR	24.62 (171925.14)	78.77 (26145.92)	35.14 (42499.77)
		100 (33195.76)	***100 (120936.14)***
TOTAL	***100 (698384.99)***	***4.75 (33195.76)***	***17.32 (120936.14)***

Na região nordeste, onde encontram-se cerca de 15% destes ecocomplexos arbóreos, as áreas efetivamente protegidas somam pouco mais de 300 ha. Este tipo de situação não alcança 5000 ha na região sudeste, que apresenta a maior extensão territorial destes sistemas arbóreos. A região sul representa a melhor cobertura de ecocomplexos arbóreos quaternários em unidades de conservação de proteção integral, totalizando mais de 28000 ha.

Em uma base estadual, os dados da tabela 4.21 demonstram que das 14 unidades da federação que possuem cobertura de sistemas arbóreos quaternários, menos da metade conta com áreas protegidas em unidades de conservação de proteção integral. No conjunto destas unidades federativas o estado do Paraná assume uma posição bastante destacada, já que em seu território situam-se quase 80% das áreas deste grupo de sistemas sob regime de proteção integral.

Já para as unidades de uso sustentável, a região sudeste apresenta uma melhor representação, enquanto o sul encontra-se em situação razoável e o nordeste novamente figura com reduzidas superfícies dentro de unidades de conservação.

Na representatividade dos estados com respeito a UCs de uso sustentável contendo alguma porção de ecocomplexos arbóreos quaternários, a melhor situação corresponde ao território de São Paulo, com cerca de 70000 ha, seguido do estado do Paraná.

As áreas de sistemas arbóreos do quaternário costeiro que estão representadas na rede de unidades de conservação federal situam-se dentro dos limites de 14 UCs de proteção integral e de 19 UCs de uso sustentável, que são relacionadas a seguir (tab. 4.22).

Esta análise, apesar de preliminar, indica várias questões importantes a serem consideradas ao se definir ações conservacionistas prioritárias para os sistemas arbóreos quaternários da Mata Atlântica. Não resta dúvida de que no recorte territorial analisado a área coberta por unidades de conservação federais de uso indireto é insuficiente para conservar uma parcela significativa da biodiversidade destes ecossistemas. Na situação atual, fica claro que as unidades de conservação existentes protegem apenas uma pequena parte dos conjuntos espaciais formados pela combinação destes sistemas, sendo que além de reduzida, a cobertura dentro da rede de UCs federais é pouco representativa em termos regionais e estaduais, onde o setor nordeste apresenta a situação mais crítica.

Tabela 4.22. Relação das unidades de conservação federal que contém áreas de ecossistemas arbóreos quaternários.

UCs de Proteção Integral	***UF***
E.E. do Taim	RS
P.N. da Lagoa do Peixe	RS
P.N. de Aparados da Serra	RS
E.E. de Carijós	SC
P.N. Saint-Hilaire/Lange	PR
E.E. de Guaraqueçaba	PR
P.N. do Superagui	PR
P.N. da Serra da Bocaina	SP
P.N. Jurubatiba	RJ
R.B. de Poço das Antas	RJ
R.B. de Comboios	ES
R.B. de Sooretama	ES
P.N. do Monte Pascoal	BA
R.B. de Una	BA
UCs de Uso Sustentável	
A.P.A. da Baleia Franca	SC
R.Ex. Pirajubaé	SC
A.P.A. de Anhatomirim	SC
A.P.A. de Guaraqueçaba	SP
R.Ex. Mandira	SP
A.P.A. de Cananéia-Iguape-Peruíbe	SP
A.P.A. de Guaraqueçaba	PR
A.R.I.E. Ilha do Ameixal	SP
A.P.A. de Guapi-Mirim	RJ
A.P.A. da Bacia do Rio São João/Mico-Leão-Dourado	RJ
A.P.A. de Petrópolis	RJ
F.N. de Goytacazes	ES
F.N. Rio Preto	ES
R.Ex. Baia de Iguape	BA
A.P.A. da Costa dos Corais	PE
A.R.I.E. Manguezais da Foz do Rio Mamanguape	PB
A.P.A. da Barra do Mamanguape	PB
R.Ex. Delta do Parnaíba	PI
A.P.A. Delta do Parnaíba	PI

4.6.8. ANÁLISE DE ASSOCIAÇÃO ESPACIAL

Como pode ser observado no tabela 4.23, os resultados das análises de associação espacial, efetuadas através do cálculo da estatística de autocorrelação espacial global, demonstram que a distribuição dos sistemas arbóreos apresenta padrão espacial agregado nos três níveis hierárquicos, de ecótopos, ecocomplexos de 1ª ordem e ecocomplexos de 2ª ordem (tab. 4.23).

Os valores obtidos para os índices globais I de Moran dentro da contigüidade espacial de primeira ordem indicam que a distribuição de todas as classes de ecótopos e de ecocomplexos de sistemas arbóreos quaternários costeiros apresenta autocorrelação espacial positiva, com valores de I próximos de 1 e com alta significância estatística, o que configura um padrão espacial de atração e de distribuição em aglomerados.

Neste sentido, é interessante notar que em uma análise realizada sobre estudos ecológicos publicados de 1989 a 2001 e referentes ao tema de autocorrelação espacial, Pinto *et al*. (2003) concluíram que apenas 13% dos estudos não detectaram autocorrelação positiva.

Ainda que as análises aqui apresentadas tenham sido realizadas apenas para o primeiro "lag" espacial, o conjunto destes resultados permite rejeitar a hipótese nula de que a distribuição geográfica dos sistemas arbóreos quaternários costeiros do Brasil oriental apresenta caráter uniforme ou aleatório ao longo de escalas espaço-temporais e de organização biológica. Assim sendo, os resultados corroboram a hipótese de que a distribuição geográfica dos sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica apresenta-se organizada em agregados, o que foi demonstrado nas três escalas espaciais estudadas.

Tabela 4.23. Resultado das análises de autocorrelação espacial global (I de Moran) na distribuição dos sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica, nos três níveis hierárquicos estudados. *** Todos os índices foram estatisticamente significantes ($p<0.0001$) para ambos os testes de significância, utilizando a distribuição normal e a obtida por permutações.

Nível + 1: paisagem global da Mata Atlântica, resolução de 500m	
Classe de ecocomplexos de 2ª ordem	***I de Moran******
Sistemas de Cobertura Arbórea	0.9887
Nível 0: paisagem regional do litoral norte de SC a sul de SP, resolução de 90m	
Classe de ecocomplexos de 1ª ordem	***I de Moran******
AAC	1.0532
AAEh/O	1.0493
AAEn	1.0515
ABEn	1.0529
ABG/NF/Cg	1.0201
ABGt	1.0090
ABO	1.0475
ABS	1.0349
AMEh/O	1.0638
AMEn	1.0617
AMG/NF/Cg	1.0531
AMGt	1.0044
MAS	1.0654
Nível -1: paisagem local da planície de Superagüi, litoral do PR, resolução de 30m	
Classe de ecótopos	***I de Moran******
AAC	1.0266
AAEh/O	0.9812
AAEn	1.0055
ABEn	1.0005
ABG/NF/Cg	0.9888
ABGt	0.9548
ABO	1.0006
ABS	0.9829

AMEh/O	0.9953
AMEn	1.0010
AMG/NF/Cg	0.9916
AMGt	0.9787
MAS	0.9829

Legenda das classes: (**AAEn**) Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Média secundária intermediária; Formação Arbórea Baixa secundária intermediária)*. (**ABS**) Formação Arbórea Baixa secundária intermediária. (**AMS**) Formação Arbórea Média secundária intermediária. (**AAEh/O**) Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo. (**AMG/NF/Cg**) Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleicos *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*. (**AMEh/O**) Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico)*. (**ABGt**) Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo tiomórfico. (**ABG/NF/Cg**) Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*. (**ABO**) Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo. (**ABEn**) Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico. (**AMGt**) Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico. (**AMEn**) Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo)*. (**AAC**) Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo.

4.6.9. CRIAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS E DOS BANCOS DE DADOS ALFANUMÉRICOS GEOCODIFICADOS

A totalidade das operações descritas desde a seleção das variáveis até a construção final da base de dados geocodificados, resultou na criação de um modelo digital do ambiente multiescalar composto por planos de informação (PIs) que permitiram descrever a heterogeneidade e a complexidade ambiental dos recortes geográficos em análise. Estes PIs representaram quatro grupos de descritores: os produtos de imageamento remoto e seus derivados; os registros de ocorrência dos sistemas vegetacionais; as variáveis morfo-geológicas e os descritores de limites administrativos. O conjunto é composto por variáveis de fácil obtenção e mensuração, compatíveis com sistemas padronizados de classificação de cobertura do solo, que foram selecionadas com base em seu potencial para caracterizar a distribuição geográfica dos sistemas alvo, bem como indicar o impacto antópico dentro de sua distribuição.

Nesta base de dados geocodificada, os três Bancos de Dados Geográficos (BDGs) em conjunto, da maneira como foram criados, permitiram a operacionalização da abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas na estratégia da "escada escalar" proposta por Wu (1999).

Os BDGs foram estruturados hierarquicamente e forneceram suporte para a criação de uma base de dados na qual os sistemas arbóreos quaternários costeiros do Brasil Oriental foram modelados de forma espacialmente explícita, segundo os conceitos de ecótopos, ecocomplexos de 1ª ordem e ecocomplexos de 2ª ordem.

Estas três classes de entidades espaciais aninharam-se compondo uma tríplice arquitetura de níveis hierárquicos, desenhada na seguinte configuração (fig. 4.17):

nível +1: paisagem global do quaternário costeiro da Mata Atlântica, resolução de 500m.

nível 0: paisagem regional do litoral norte de SC a sul de SP, resolução de 90m.

nível -1: paisagem local da planície de Superagüi, litoral norte do PR, resolução de 30m.

A arquitetura aninhada possibilitou que a informação associada a cada entidade pudesse ser recuperada ao longo dos níveis hierárquicos, permitindo assim a passagem de escala.

A estrutura também possibilitou a associação de bancos de dados convencionais alfanuméricos, que foram geocodificados pela posição espacial dos centróides de ecótopos e ecocomplexos. Desta maneira, foi possível tratar as entidades geográficas tanto de forma isolada quanto combinadamente, bem como transitar e recuperar informação ao longo das escalas.

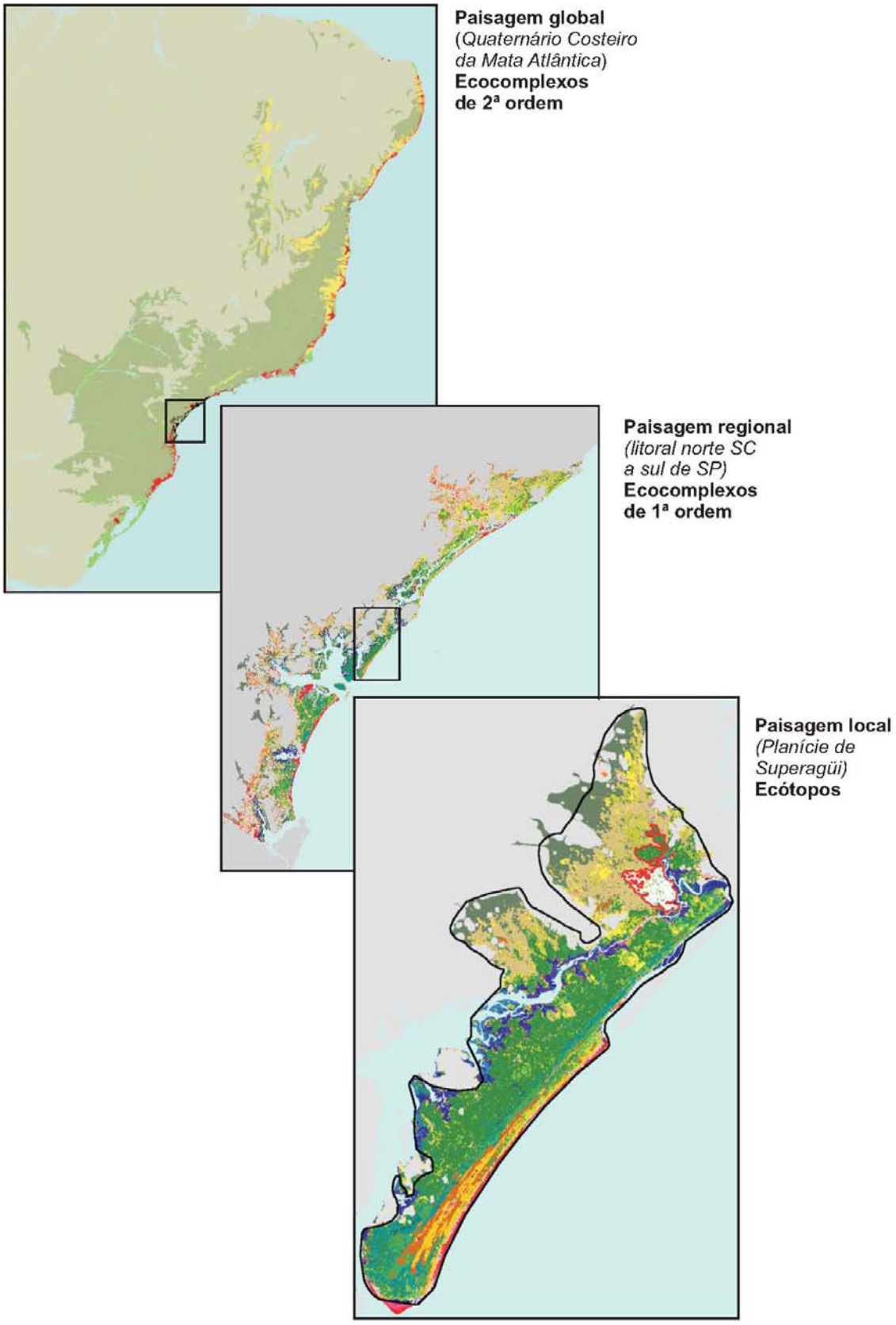
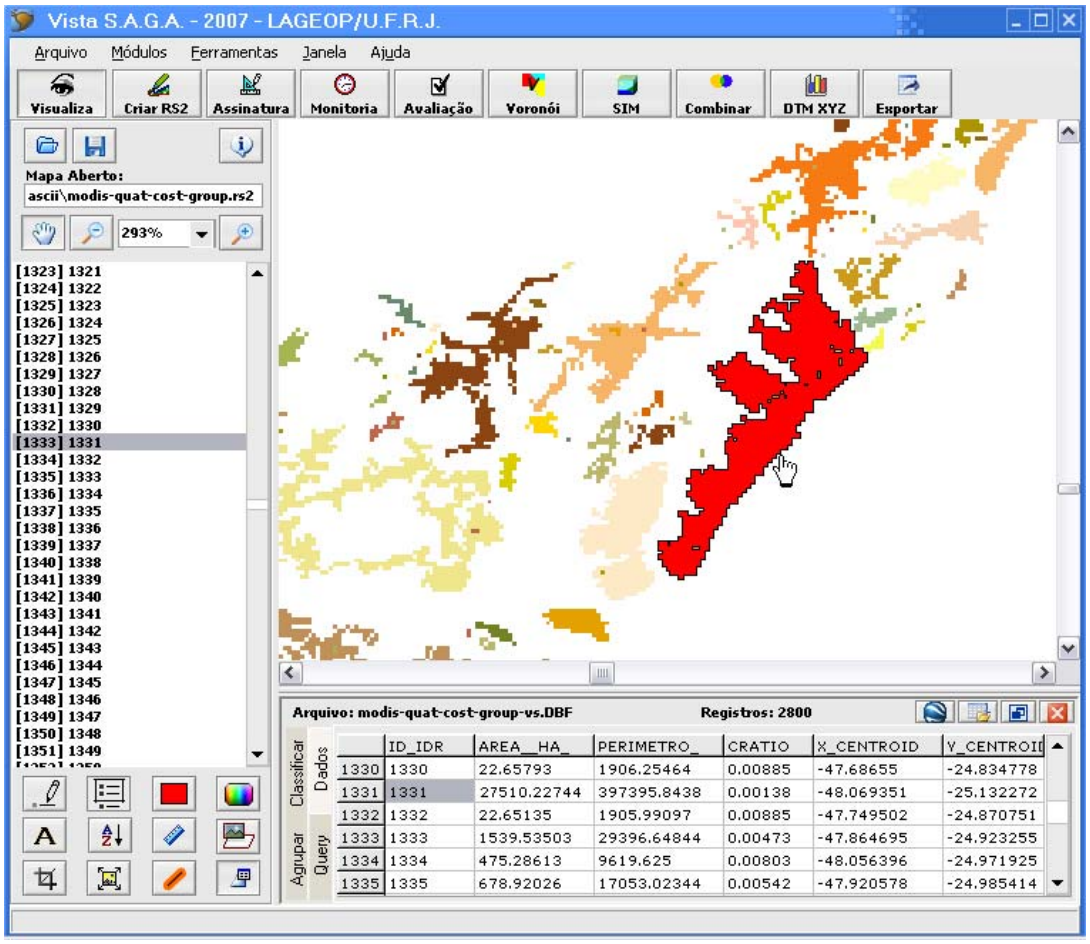


Figura 4.17. Arquitetura dos BDGs hierárquicos. Na parte inferior da figura, estão traçados os limites referentes a um ecocomplexo de 2ª ordem (contorno preto), a um ecocomplexo de 1ª ordem (contorno vermelho) e a um ecótopo (preenchido em branco).

4.6.9.1. Banco de dados de índices de paisagem

Os bancos de dados alfanuméricos contendo medidas descritoras de padrão espacial (*e.g.* índices de área; de perímetro; índice de compactação-IC; dimensão fractal-DF; índice de fragmentação-IF etc.) consistiram de três grupos distintos, associados a cada BDG.

Para a paisagem global do quaternário costeiro do Brasil oriental foram criados dois bancos de dados, um associado à distribuição dos sistemas arbóreos na situação atual (2001) e outro à distribuição pretérita (cenário pré-colonização européia), sendo que em ambos a geocodificação foi relacionada à posição do centróide das manchas de ecocomplexos de 2ª ordem (fig. 4.18).



	ID_IDR	AREA_HA_	PERIMETRO_	CRATIO	X_CENTROID	Y_CENTROID
1330	1330	22.65793	1906.25464	0.00885	-47.68655	-24.834778
1331	1331	27510.22744	397395.8438	0.00138	-48.069351	-25.132272
1332	1332	22.65135	1905.99097	0.00885	-47.749502	-24.870751
1333	1333	1539.53503	29396.64844	0.00473	-47.864695	-24.923255
1334	1334	475.28613	9619.625	0.00803	-48.056396	-24.971925
1335	1335	678.92026	17053.02344	0.00542	-47.920578	-24.985414

Figura 4.18. Banco de dados de índices de paisagem associado a ecocomplexos de 2ª ordem no BDG da paisagem global do quaternário costeiro da Mata Atlântica, com resolução de 500m.

No caso da paisagem regional do norte de SC ao sul de SP, em função do grande número total de manchas, que excedeu o limite máximo das operações em 32 bits, houve a necessidade de elaborar um banco de dados para cada classe de ecocomplexos de 1ª ordem, sendo a geocodificação associada aos centróides de cada mancha de ecocomplexo de 1ª ordem (fig. 4.19).

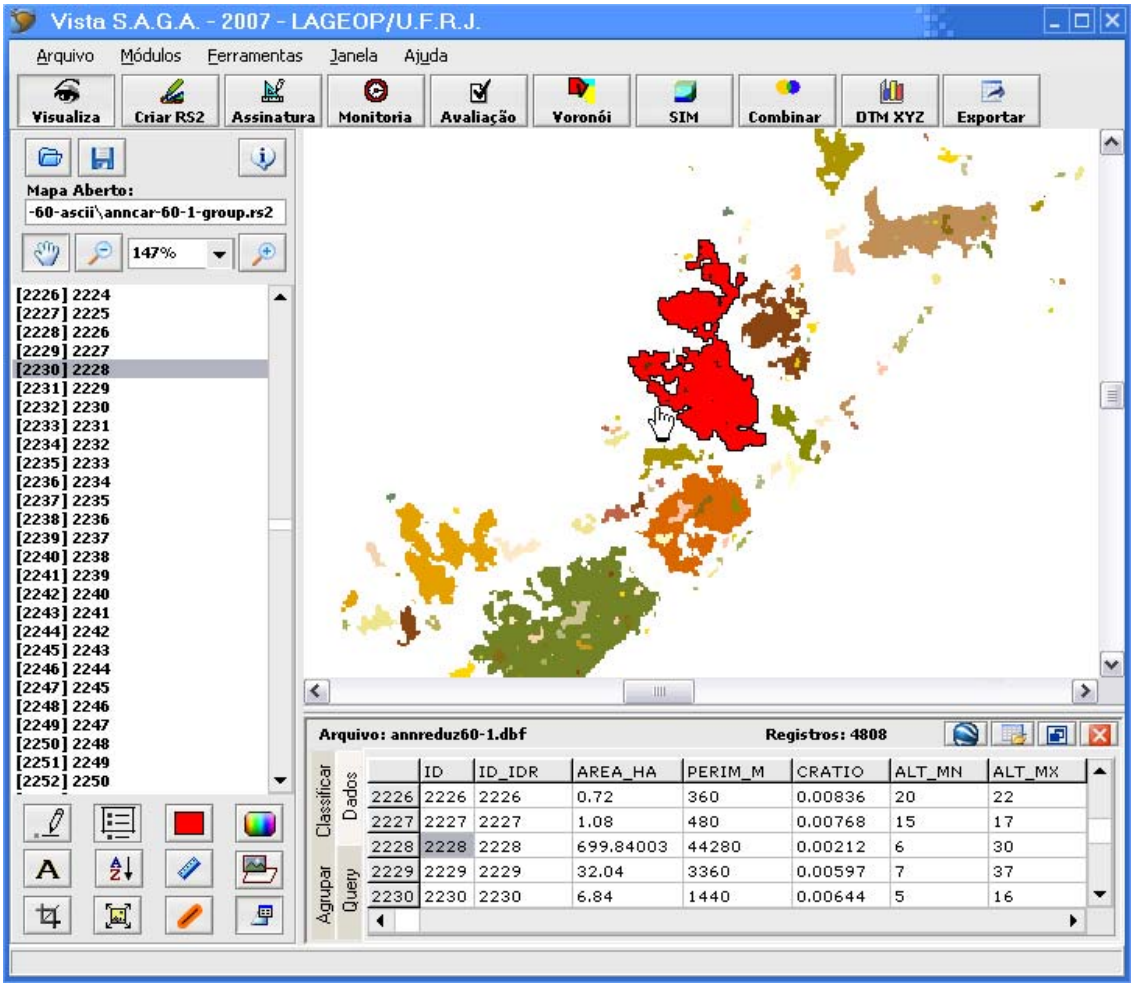


Figura 4.19. Banco de dados de índices de paisagem associado a ecocomplexos de 1ª ordem no BDG da paisagem regional do litoral do norte de SC ao sul de SP, com resolução de 60m.

Para a paisagem local da planície de Superagüi, no litoral norte do PR, foi possível criar um único banco de dados abrangendo todos os ecótopos, cuja geocodificação correspondeu à posição do centróide de cada mancha (fig. 4.20).

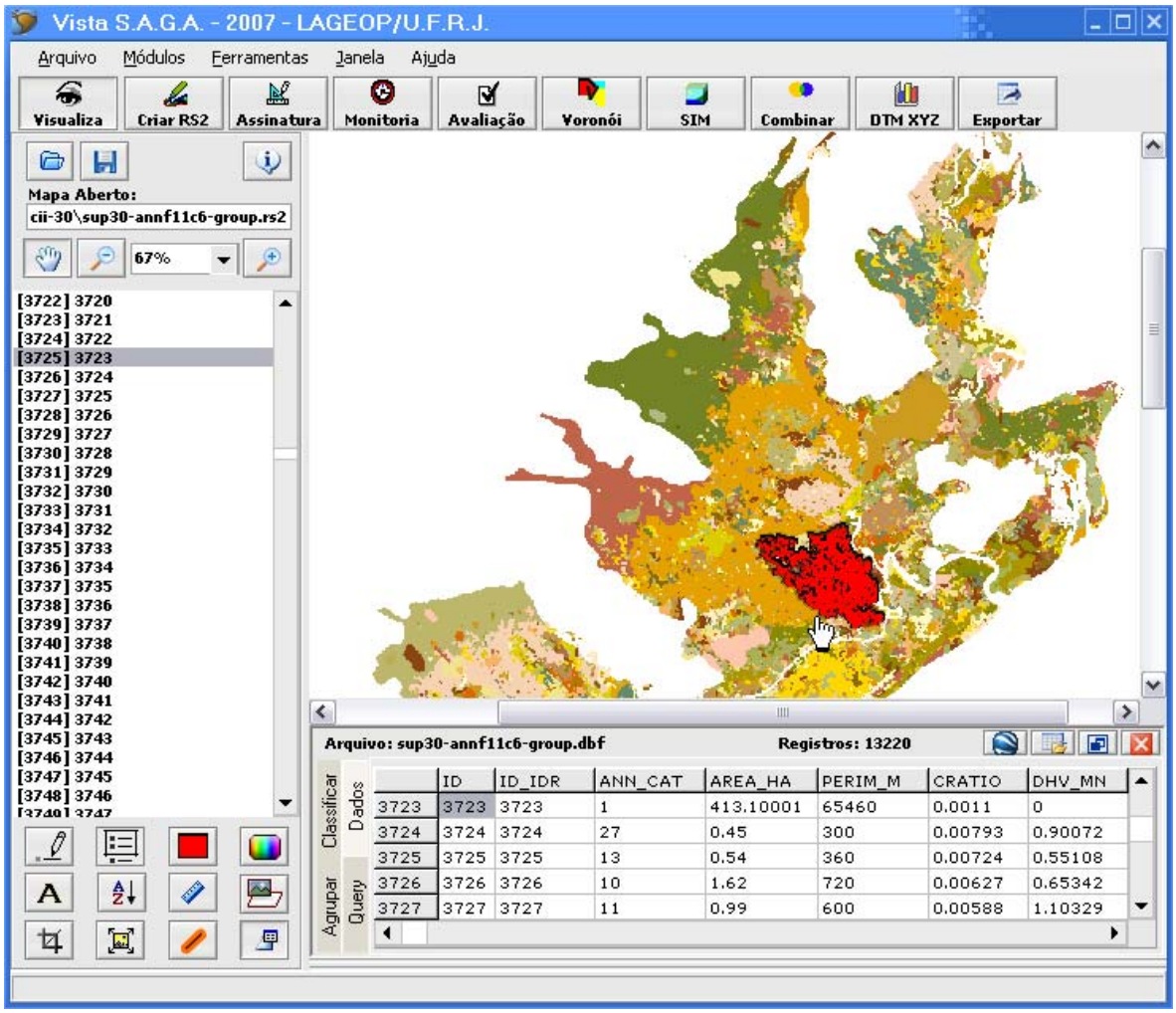


Figura 4.20. Banco de dados de índices de paisagem associado a ecótopos no BDG da paisagem local da planície de Superagï, litoral norte do PR, com resolução de 30m.

4.6.9.2. Banco de dados de levantamentos fitossociológicos

Após a etapa de levantamento de publicações sobre inventários fitossociológicos em dissertações; teses; anais de congressos (de Biologia, Ecologia, Botânica e de Floresta);

relatórios técnicos e artigos em periódicos nacionais e internacionais, foi iniciada a fase de construção de um banco de dados alfanumérico com informação de cadastro dos levantamentos fitossociológicos realizados em sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica.

Na primeira etapa de elaboração deste banco de dados, foram incorporados atributos referentes a 35 levantamentos fitossociológicos realizados na região do litoral norte de SC ao sul de SP.

Os atributos incluíram informação sobre autoria; referência bibliográfica; localização das parcelas; município em que o levantamento foi feito; data do levantamento; metodologia empregada (*e.g.* área amostrada, método de amostragem, diâmetro mínimo de enumeração de elementos, número de espécies amostradas etc.); os parâmetros fitossociológicos globais e a lista de espécies com os parâmetros fitossociológicos específicos (*e.g.* densidade relativa, densidade absoluta, freqüência relativa, freqüência absoluta, dominância relativa e dominância absoluta etc.). Atributos de tipo de solo, substrato geomorfológico e geológico, altimetria e atividades antópicas, quando disponíveis, também foram incluídos ao banco.

A geocodificação foi efetuada sobre a base espacial de maior detalhe, sendo que as posições geográficas dos levantamentos foram digitalizadas e posteriormente relacionadas aos ecótopos (fig. 4.21).

O processo de criação deste banco de dados está sendo desenvolvido com vistas a permitir a realização futura de meta-análises da estrutura da vegetação em diversas escalas.

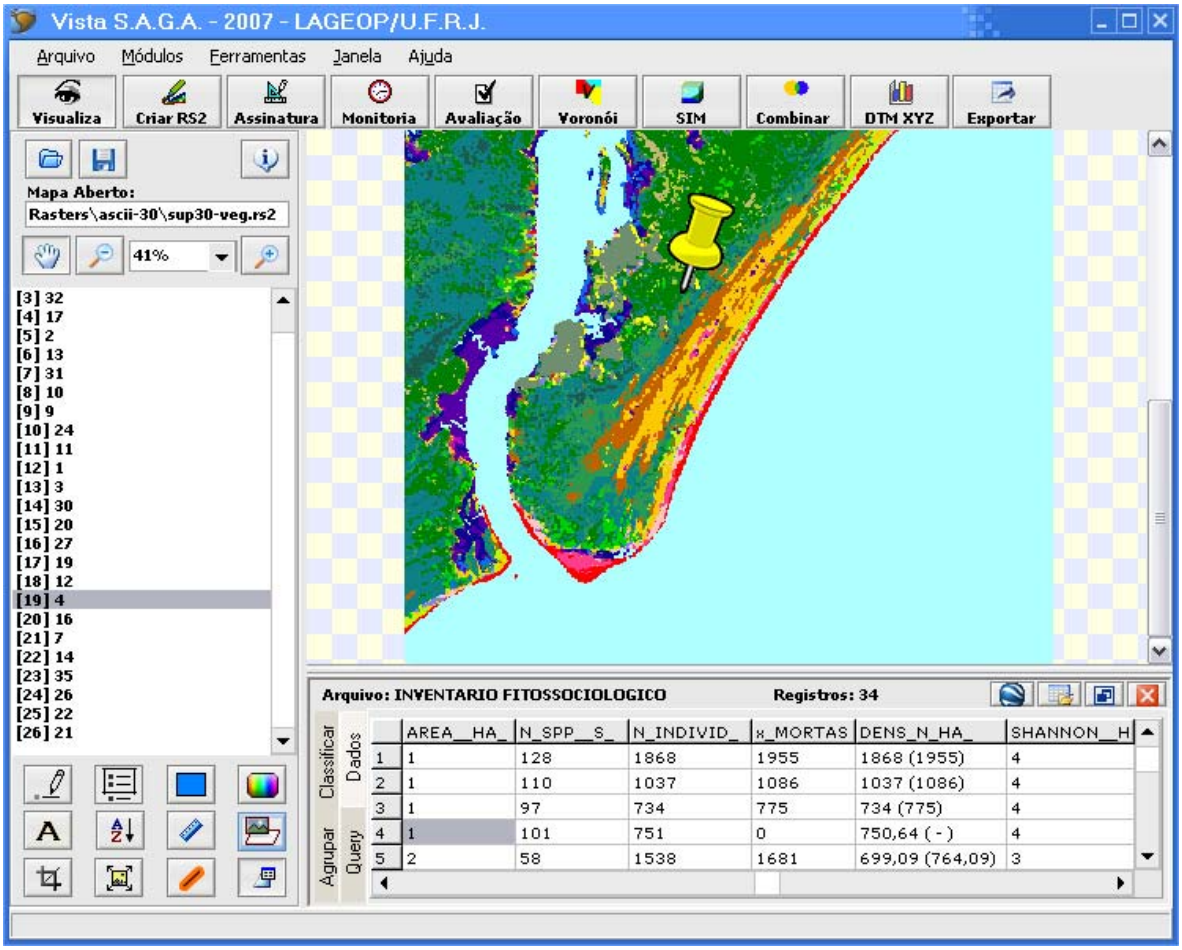


Figura 4.21. Banco de dados de levantamentos fitossociológicos associado a ecótopos no BDG da paisagem regional do litoral do norte de SC ao sul de SP, na versão com a resolução melhorada para 30m.

4.7. Conclusões do capítulo

Este capítulo encerra-se com as seguintes colocações finais, que apresentam as conclusões derivadas dos resultados obtidos neste estudo de caso envolvendo os sistemas arbóreos quaternários costeiros da Floresta Atlântica. Para permitir uma melhor avaliação desta pesquisa, o texto encontra-se estruturado segundo as sete hipóteses levantadas no início do capítulo.

Hipótese 1: Sobre a adequação de sistemas de classificação de cobertura do solo

No processo de construção da legenda envolvendo o mapeamento de coberturas do solo sobre superfícies quaternárias do litoral sul brasileiro entre o norte de SC e o sul de SP, ficou demonstrado que o sistema internacional escolhido, o "Land Cover Classifiction System - LCCS", constitui um sistema de classificação robusto e abrangente, que possibilitou descrever em bom detalhe as classes de cobertura existentes.

Em comparação ao Sistema Fitogeográfico Brasileiro adotado pelo IBGE, o melhor desempenho indicado para o LCCS na definição das classes de cobertura deve-se a sua maior flexibilidade, no sentido de permitir que o elenco e a seqüência dos classificadores utilizados sejam definidos segundo as necessidades do usuário.

Concomitantemente, também ficou comprovado que o processo de trânsito e tradução entre as classes geradas pelo LCCS e as categorias existentes no Sistema Fitogeográfico Brasileiro não apresentou maiores dificuldades.

O conjunto destes resultados observados corroboram a hipótese de que o sistema de classificação de cobertura do solo global utilizado, no caso o "Land Cover Classification System - LCCS" / FAO-UNEP, permitiu definir uma legenda adequada para o mapeamento regional de sistemas quaternários do Brasil oriental.

Hipótese 2: Sobre o desempenho de algoritmos classificadores não-lineares de aprendizagem de máquina

Na avaliação de desempenho dos algoritmos classificadores de imagens de sensoriamento remoto, os valores do índice Kappa global obtidos pelos três produtos analisados apontam a melhor performance do algoritmo de Rede Neural Artificial, que foi o único a alcançar um valor geral de Kappa considerado excelente (> 0,8). Os resultados obtidos pelo algoritmo de Máxima Verossimilhança e pelo classificador LDA de Fisher

correspondem à segunda e à terceira posição em peformance, alcançando valores de Kappa considerados muito bons (entre 0,6 e 0,8).

Estas estatísticas resultantes da avaliação de desempenho dos algoritmos de classificação digital de imagens corroboram a hipótese de que os classificicadores não-lineares de aprendizagem de máquina, representados neste estudo pelas Redes Neurais Artificais, apresentam maior eficiência do que algoritmos tradicionais de sensoriamento remoto como a Análise Linear Discriminante de Fisher ou o classificador de Máxima Verossimilhança.

Na avaliação de desempenho dos mapeamentos finais, as duas classificações geradas pelas RNAs, tanto a partir dos produtos do sensor Landsat-7/ETM+ em resolução de detalhe (30m) quanto dos produtos MODIS em resolução moderada (500m), foram qualificadas como excelentes, alcançando, respectivamente, valores de 0,96 e 0,88 em índices de acurácia global Kappa.

Ainda que sejam exigentes em termos de tempo de trabalho, os resultados obtidos sugerem que técnicas de inteligência artificial, tais como o aprendizado de máquina em modelos conexionistas como as RNAs, podem constituir instrumentos valiosos para o reconhecimento de padrões em situações complexas, sobretudo em modelagens envolvendo grande número de classes.

Hipótese 3: *Sobre a efetividade da estratégia de mapeamento multi-resolução e multi-sensor*

Segundo a avaliação de desempenho do produto cartográfico final, a classificação efetuada a partir dos produtos MODIS em resolução moderada (500m), geradora do mapeamento da distribuição dos sistemas arbóreos quaternários costeiros do domínio da Mata Atlântica, alcançou um valor para o índice de acurácia global Kappa considerado excelente (Kappa > 0,8).

Neste processo de classificação, as amostras de treinamento foram obtidas a partir do mapeamento regional de coberturas do solo sobre superfícies quaternárias do litoral sul brasileiro entre o norte de SC e o sul de SP, que foi baseado em três cenas Landsat-7/ETM+ com resolução de detalhe (30m).

Ainda que um produto simples como este mapa "arbóreo/não arbóreo" tenha aplicação limitada para muitas das necessidades das ações de conservação e manejo da biodiversidade, este tipo de mapeamento pode prover rápida informação sobre a cobertura do solo em grandes extensões espaciais, apontando regiões críticas onde análises de sensoriamento remoto de maior resolução e campanhas de levantamentos de campo deveriam ser empreendidas.

Outro ponto que merece ser ressaltado é o custo/benefício desta classificação MODIS, uma vez que o mapeamento final apresentou uma abrangência geográfica considerável, cuja cobertura corresponderia a bem mais de 30 cenas Landsat-7/ETM+.

Em conjunto estes resultados indicam que a combinação multiespectral das abordagens de mosaicos detalhados Landsat-7/ETM+ com a dos produtos MODIS de resolução melhorada pode constituir um estratégia eficaz para análises de cobertura do solo envolvendo grandes extensões geográficas. Assim sendo, corrobora-se a hipótese de que esta estratégia multi-resolução e multi-sensor possibilita integrar janelas de maior detalhe e janelas sinópticas na geração de mapeamentos regionais e macrorregionais.

Hipótese 4: Sobre o padrão de distribuição geográfica dos sistemas arbóreos quaternários costeiros do Brasil oriental

Os resultados obtidos permitem caracterizar a distribuição dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros na região do litoral norte de SC ao sul de SP como predominantemente florestais, sendo que as paisagens ainda exibem configurações onde a matriz está composta pricipalmente por coberturas arbóreas (mais de 70%) e as manchas incidentes constituem as

áreas antrópicas (menos de 20%). Destacam-se como as formações mais representativas em termos de extensão geográfica e de grau de integridade aquelas desenvolvidas sobre Espodossolos e Organossolos, correspondentes sobretudo a vegetações de Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas e Formações Pioneiras Arbóreas de Influência Marinha. As manchas antrópicas configuram uma paisagem ainda de predomínio rural, com mais de 14% correspondendo a áreas agropecuárias de forrageiras para gado, rizicultura e bananicultura, sendo que áreas urbanas ocupam menos de 5% da região.

Já para o recorte da costa leste do Brasil, os resultados indicam que a distribuição dos sistemas arbóreos quaternários configura paisagens de matriz predominantemente aberta, com mais de 80% de coberturas não-vegetadas ou não-arbóreas, onde as manchas incidentes correspondem aos pouco mais de 10% de remanescentes arbóreos.

Em relação aos resultados das análises de associação espacial na distribuição dos sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica, os valores próximos de 1 obtidos para os índices globais I de Moran apontam a presença de autocorrelação espacial positiva nos três níveis hierárquicos, desde ecótopos e ecocomplexos de 1ª ordem até ecocomplexos de 2ª ordem, o que configura um padrão espacial de atração e de distribuição em aglomerados

Tais resultados refutam a hipótese nula de distribuição aleatória ou uniforme e corroboram a hipótese de que a distribuição geográfica dos sistemas arbóreos quaternários costeiros do Brasil oriental apresenta-se organizada em agregados ao longo de escalas espaço-temporais e de organização biológica.

Hipótese 5: Sobre a redução e fragmentação dos sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica

Os resultados da monitoria entre a situação pretérita pré-colonização européia e a situação atual em 2001 revelaram que pouco mais de 20% das áreas originalmente arbóreas

permaneceram nesta categoria, sendo que a porcentagem de cobertura arbórea que abrangia mais de 56% da distribuição pretérita passou para cerca de 12% na situação atual.

Na situação mapeada em 2001 apenas a região do litoral sul de São Paulo ao norte de Santa Catarina, no trecho compreendido entre São Sebastião (SP) e Joinville (SC), ainda permanece com boa cobertura arbórea, sendo que é também neste setor da faixa costeira quaternária que se encontram praticamente todos os ecocomplexos arbóreos com mais de 1000 ha.

Os índices descritores de paisagem também atestam mudanças significativas na distribuição dos ecocomplexos arbóreos litorâneos, sendo que os valores dos índices da situação atual apresentaram um expressivo decréscimo de mais de doze vezes para a área média das manchas, de mais de seis vezes para o perímetro, além de diminuição na dimensão fractal, na diversidade de classes de vegetação e de substrato geológico.

Ao mesmo tempo em que na situação de 2001 detectou-se uma diminuição da área das manchas, o número total destes componentes aumentou de 1193 para 2800, sendo observada uma nítida tendência de aumento na proporção das manchas de menor tamanho (de 20 a 200 ha), enquanto no sentido inverso constata-se um decréscimo na porcentagem dos componentes nas classes acima de 200 ha.

Neste sentido, na comparação dos dois cortes temporais analisados, tanto os resultados da monitoria quanto os da análise dos índices de paisagem corroboram a hipótese de que a distribuição geográfica atual dos sistemas arbóreos quaternários costeiros da Mata Atlântica encontra-se reduzida e fragmentada, refletindo sobretudo o impacto da ocupação antrópica na faixa litorânea brasileira.

Hipótese 6: Sobre a representatividade dos sistemas arbóreos do quaternário costeiro da Mata Atlântica na rede de unidades de conservação federais

Os resultados da análise de lacunas enfocando o sistema federal de unidades de conservação demonstram que menos de 5% das áreas atualmente ocupadas por ecocomplexos arbóreos no quaternário costeiro do leste do Brasil encontram-se protegidas em unidades de conservação de proteção integral.

Em uma base regional, a menor cobertura destes sistemas em áreas efetivamente protegidas encontra-se na região nordeste, com pouco mais de 300 ha. Na posição intermediária figura a região sudeste, onde este tipo de situação não alcança 5000 ha, sendo que a melhor cobertura de ecocomplexos arbóreos quaternários em unidades de conservação de proteção integral, totalizando mais de 28000 ha, situa-se na região sul.

Em termos estaduais, os resultados demonstram que das 14 unidades da federação que possuem cobertura de sistemas arbóreos quaternários, menos da metade conta com áreas protegidas em unidades de conservação de proteção integral. Neste contexto, o estado do Paraná destaca-se por abrigar quase 80% das áreas destes sistemas que se encontram em regime de proteção integral.

Estes resultados corroboram a hipótese de que os sistemas arbóreos do quaternário costeiro da Mata Atlântica encontram-se insuficientemente representados dentro da rede de unidades de conservação federais.

Hipótese 7: Sobre a eficácia da abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação

A construção da base de dados geocodificados em ambiente de Sistema Geográfico de Informação (SGI) resultou na criação de um modelo digital do ambiente de natureza

multiescalar e composto por planos de informação que permitiram descrever a heterogeneidade e a complexidade ambiental dos recortes geográficos em análise.

Nesta base de dados geocodificada, os três Bancos de Dados Geográficos (BDGs) conjugados e estruturados hierarquicamente permitiram operacionalizar a abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas (DHM) na estratégia da "escada escalar".

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo evidenciam que o arcabouço DHM/SGI possibilitou que os sistemas arbóreos quaternários costeiros do Brasil Oriental fossem analisados e modelados de forma espacialmente explícita, segundo os conceitos das entidades de ecótopos e ecocomplexos de 1ª e 2ª ordem. Nesta estrutura também foi possível associar bancos de dados alfanuméricos convencionais, que foram geocodificados e puderam ser relacionados àquelas entidades.

O arcabouço hierárquico multiescalar desenvolvido, partindo do *pixel* para o ecótopo e deste para o ecomplexo de 1ª e 2ª ordem, permitiu a passagem de escala desde o nível local dos levantamentos de campo e de variáveis em resoluções espaciais de alto detalhe, até o nível global do Domínio da Mata Atlântica em resoluções moderadas de 500m.

Adicionalmente, esta estrutura também proporcionou a integração e a avaliação de algoritmos de inteligência artificial, como os modelos conexionistas de Redes Neurais Artificiais, na modelagem de distribuição em nível de ecossistema.

Em suma, estes resultados em conjunto corroboram a hipótese de que a abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação permite transitar nas escalas local, de paisagem, de região (norte de SC, PR e sul de SP) e de bioma ou global (domínio da Mata Atlântica) em análises de sistemas arbóreos quaternários costeiros.

Capítulo 5

Nível de ecossistemas: gênese dos ambientes

Nothing in biology makes sense except in the light of evolution.
Theodosius Dobzhansky

All organisms interact with other organisms and their environments; i.e., the evolutionary play takes place within an ecological theater.
G. E. Hutchinson

Flesh (life) and rocks (Earth) evolve together.
Léon Croizat

The Quaternary is the bridge between the recent and the deep past.
Russ Graham

Este capítulo encerra o primeiro estudo de caso desenvolvido nesta tese, que se desenvolve em nível de organização biológica de ecossistemas. Nesta segunda parte do estudo de caso a ênfase dirige-se para a passagem de escalas temporais desde o presente até o pretérito geológico. O estudo abrange modelagem conceitual sobre a gênese dos sistemas vegetacionais de ambientes quaternários costeiros no recorte geográfico do litoral do Brasil, cujas predições de distribuição são avaliadas em escala de paisagem local e regional (sistemas vegetacionais do litoral norte de SC, PR e sul de SP). Na escala local, esboços de evolução paleogeográfica dos ambientes litorâneos são desenvolvidos, passando pelas escalas de tempo desde o pleistoceno até o presente. A seção introdutória 5.1 discorre sobre a dimensão temporal da biodiversidade e o impacto das mudanças ambientais no Quaternário sobre a distribuição da biodiversidade. Nas secções subseqüentes são apresentados a abordagem, os objetivos e as hipóteses da pesquisa. Em 5.5 são descritas as fontes e métodos empregados. Na seção 5.6 são apresentados os resultados principais e discussões a eles pertinentes. Por último, no item 4.7 são relacionadas as conclusões da pesquisa.

5.1. Considerações inicias

A distribuição da diversidade da vida em nosso planeta apresenta-se dinâmica ao longo do espaço e do tempo, de modo que, conforme já mencionado nos capítulos precedentes, a biodiversidade em seus distintos níveis de organização exibe padrões que se manifestam em diferentes escalas nas dimensões espaciais e temporais.

Em nível de organização de ecossistema, o capítulo anterior abordou a distribuição dos sistemas arbóreos do quaternário costeiro do Domínio da Mata Atlântica, enfatizando o tratamento de múltiplas escalas espaciais tomadas em dimensão temporal histórica e atual.

O presente capítulo também foi desenvolvido dentro deste escopo de análise, contudo, a abordagem aqui adotada dirige a ênfase para o tratamento da dimensão temporal, transitando desde escalas do tempo presente até o pretérito geológico.

Um modelo conceitual de gênese dos sistemas vegetacionais de ambientes quaternários é elaborado para a faixa litorânea brasileira e, através de procedimentos de geoprocessamento, as predições de distribuição derivadas do modelo são avaliadas em escala de paisagem regional e local.

Na janela de paisagem local são desenvolvidos quadros da evolução paleogeográfica dos ambientes litorâneos, passando pelas escalas de tempo desde o Pleistoceno até o presente.

5.1.1. MUDANÇAS AMBIENTAIS E A DIMENSÃO TEMPORAL DA BIODIVERSIDADE

A clássica composição triádica *espaço*, *tempo* e *forma*, tão presente no pensamento biogeográfico, sumariza muito bem a noção de que os sistemas biológicos existem no espaço e através do tempo.

Evidentemente, a análise de múltiplas escalas na dimensão espacial constitui uma condição fundamental para o entendimento da distribuição da biodiversidade, pois permite avaliar a *localização* e a *extensão* do espaço geográfico ocupado pelos diferentes sistemas bióticos. Muito embora de grande eficácia, se tomada em um único corte temporal, tal abordagem produziria um entendimento estático da distribuição em estudo. De fato, é a análise espacial em diferentes janelas ao longo da escala de tempo que permite avaliar as tendências, direções e velocidades de mudança do espaço ocupado, ou seja, a *dinâmica* da distribuição dos sistemas biológicos.

Em relação às escalas da dimensão temporal, cabe lembrar que a diversidade das espécies, ecossistemas e paisagens hoje existentes representa o produto de cerca de 4 bilhões de anos de evolução da vida na Terra (MOJZSIS *et al.*, 1996*;* FEDO e WHITEHOUSE, 2002). No curso de sua longa história evolutiva, a distribuição da biodiversidade não tem sido estática no espaço e no tempo (KNAPP, 2003), sendo que dados registrados por paleocientistas testemunham que o planeta atravessou muitas mudanças ambientais, tanto em termos abióticos quanto bióticos (HUGGETT, 1997; ANDERSON, GOUDIE e PARKER, no prelo).

Neste sentido, recentes avanços no conhecimento sobre o clima, um dos principais vetores de mudanças ambientais, têm revelado que o clima histórico constitui um sistema muito mais variável e complexo do que previamente imaginado (BRADLEY 1999; CRONIN 1999; RUDDIMAN 2001). Nas duas últimas décadas, o entendimento sobre o sistema climático do planeta tem sido revolucionado pelo desenvolvimento conjunto de novos instrumentos com alta precisão e resolução, de novas teorias baseadas em capacidade computacional de alta velocidade e de uma massa crítica de pesquisa empírica. A partir destes novos desenvolvimentos, emergiram várias assunções chave (MILLAR e BRUBAKER, 2006):

- *O clima oscila*. O clima oscila naturalmente, mostrando que períodos distantes no passado podem ser mais semelhantes ao presente do que o passado recente.
- *O clima apresenta ciclos em múltiplas escalas*. O clima tem variado em escalas múltiplas e aninhadas, com ciclos temporais distintos que operam em escalas multi-milenares, milenares, seculares, decadais e interanuais.
- *O clima muitas vezes modifica-se abruptamente*. As alterações climáticas podem ser graduais ou abruptas (de poucos anos até poucas décadas) e podem ser disparadas por efeitos ao acaso.
- *Os sistemas bióticos, em especial a vegetação, respondem de modo complexo às mudanças climáticas*. Os sistemas físicos e ecológicos respondem às mudanças climáticas em cada escala, com alterações muitas vezes dramáticas no tamanho populacional e na distribuição geográfica de espécies de plantas e animais, bem como na composição de comunidades.

De acordo com a informação derivada de dados geológicos, paleontológicos e paleoclimáticos, existem quatro escalas temporais de mudança climática para as quais se esperaria que houvesse razoável correspondência em relação à evidência de modificações evolutivas (BIRKS e BIRKS, 1980; BRADLEY, 1999; RUDDIMAN, 2001; BRANOSKY e KRATZ, no prelo). Estas quatro janelas temporais seriam representadas pelas escalas *tectônica*, *orbital*, *milenar deglacial* e *histórica* (fig. 5.1)

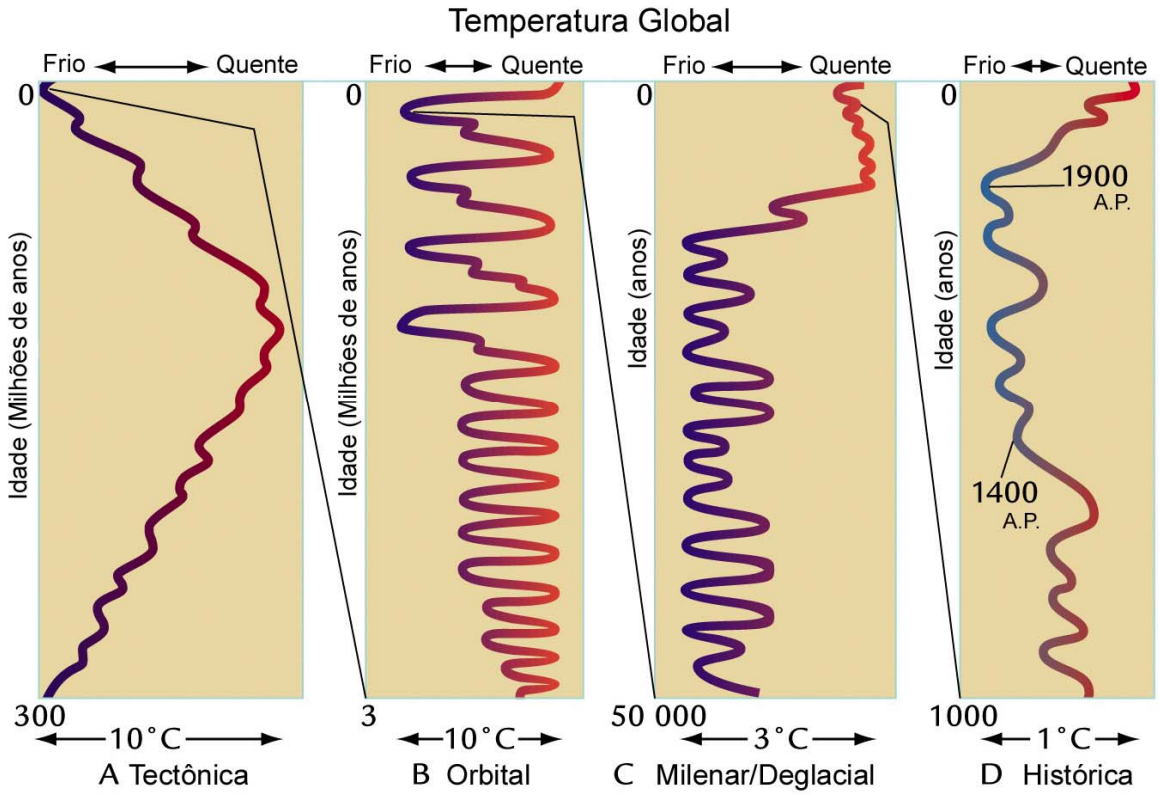


Figura 5.1. Distintas escalas de mudança climática. O tempo está representado no eixo vertical. As linhas oscilantes simbolizam a periodicidade e a amplitude de mudanças em temperatura ocorridas em diferentes escalas. O padrão geral apresenta oscilações de clima sucessivamente mais rápidas aninhadas no interior de oscilações mais lentas. Fonte: Ruddiman, 2001.

A escala *tectônica*, mensurada em períodos extremamente longos (milhões de anos), está relacionada a atividades tectônicas, com deslocamentos dos continentes e variações batimétricas associadas, reformulação de bacias oceânicas e grandes eventos de orogênese e epirogênese. Tais mecanismos podem ser responsáveis pelos superciclos mundiais de aquecimento e resfriamento ocorridos durante o Fanerozóico (últimos 500 milhões de anos) e o Cenozóico (últimos 65 milhões de anos). Nesta janela temporal, um aquecimento geral do planeta foi registrado entre cerca de 300 e 100 milhões de anos, o qual foi seguido por um resfriamento (figura 5.1-A) (RUDDIMAN, 2001; BRANOSKY e KRATZ, no prelo). Nos últimos 65 milhões de anos da escala tectônica, sobreposto ao resfriamento geral ocorreu um evento de aquecimento que durou aproximadamente de 18,5 a 14 milhões de anos atrás (RUDDIMAN, 2001; BRANOSKY e KRATZ, no prelo).

Dirigindo o foco para os últimos três milhões de anos da escala tectônica, alcança-se a escala *orbital*, caracterizada pela alternância de ciclos glaciais e interglaciais, em particular nos últimos 1,8 milhões de anos (figura 5.1-B) (RUDDIMAN, 2001; BRANOSKY e KRATZ, no prelo). Na escala de 10^4 a 10^5 anos, as denominadas periodicidades orbitais de Milankovitch, que provocam variações nas quantidades de insolação na superfície da Terra, são invocadas para explicar as transições glaciais-interglaciais, que foram bem documentadas para a Época Pleistocênica (2,5 milhões a 10 mil anos). Este forçamento externo atua como um marcador para muitas perturbações não-lineares dentro do sistema climático, incluindo retroalimentações de CO_2, mudanças de circulação oceânica e efeitos de albedo, os quais podem ser responsáveis pela magnitude das mudanças climáticas glaciais-interglaciais (ZACHOS *et al*., 2001). Nesta escala temporal cada ciclo frio-quente durou cerca de 41.000 anos até aproximadamente um milhão de anos atrás, quando os ciclos aumentaram em amplitude e duração, apresentando maior diferença entre os extremos mais quentes e mais frios, bem como uma extensão total da ordem de 100.000 anos para cada ciclo (RUDDIMAN, 2001; MILLAR e BRUBAKER, 2006; BRANOSKY e KRATZ, no prelo). Nos ciclos de 100.000 anos, os períodos glaciais frios ocupam a maior parte do ciclo e os períodos interglaciais duram cerca de 10.000 a 20.000 anos (RAYMO, 1992; 1997, RAYMO *et al*., 1997; SCHMIEDER *et al*., 2000; BARNOSKY *et al*., 2003; BRANOSKY e KRATZ, no prelo).

A escala *milenar deglacial* (figura 5.1-C), medida em milhares de anos, concentra-se na última transição quente-frio, iniciando há aproximadamente 50.000 anos. Em resoluções temporais mais refinadas, cada estádio glacial ou interglacial apresenta muitas oscilações climáticas embutidas, algumas das quais se estendem por décadas a séculos (RAYMO *et al*., 1998; SEVERINGHAUS e BROOK, 1999; BLUNIER e BROOK, 2001; BARNOSKY *et al*., 2003; BRANOSKY e KRATZ, no prelo). Alguns destes padrões de oscilação, os

denominados ciclos de Bond, apresentam duração média de 1300 a 1500 anos em cada ciclo quente/frio. São exemplos dos ciclos de Bond os períodos conhecidos como Pequena Idade do Gelo, um intervalo gelado de significativo resfriamento global ocorrido entre os anos de 1450 a 1920, bem como a Anomalia Climática Medieval, um período seco de aquecimento registrado entre os anos de 900 a 1350 (GROVE, 1988; OVERPECK *et al*., 1997; HUGHES e DIAZ, 1994; STINE, 1994; ESPER *et al*., 2002; MILLAR e BRUBAKER, 2006). Assim sendo, na escala *histórica*, medida em magnitudes de centenas a poucos anos, oscilações mais curtas e de menor amplitude são evidentes (RUDDIMAN, 2001; BRANOSKY e KRATZ, no prelo) (figura 5.1-D). Ciclos climáticos de alta freqüência, da ordem de poucos anos a várias décadas, foram recentemente definidos pelos climatologistas, sendo que o mais conhecido destes é o padrão El-Niño (DIAZ e MARKGRAF, 2000; MILLAR e BRUBAKER, 2006). Na porção final da escala histórica, no período que se estende pelos últimos anos, alcança-se a janela do tempo *atual* ou do *presente*.

Em termos de dimensões temporais da biodiversidade, freqüentemente é feita uma distinção entre as escalas de *tempo ecológico* e *evolutivo*. A escala temporal ecológica é de mais curto prazo, muitas vezes associada ao tempo de geração do sistema em estudo, cuja duração pode variar desde períodos muito breves a anuais, até aqueles muito longos que alcançam várias centenas de anos (WILLIS *et al*., no prelo, b). Os processos que operam na escala temporal ecológica encontram-se associados principalmente à escala atual e histórica de mudança ambiental.

Já a escala temporal evolutiva define-se como de longo prazo, remontando ao tempo pretérito da origem da vida (WILLIS *et al*., no prelo, b). O tempo evolutivo pode ser entendido como um sistema hierárquico de distintos níveis (BENNET, 2004) (tab. 5.1), em que os processos que operam no primeiro nível microevolutivo estão associados à escala

milenar deglacial de mudança ambiental, enquanto aqueles operando nos níveis macroevolutivos de maior hierarquia estão associados à escala tectônica.

Tabela 5.1. Hierarquia temporal dos processos que controlam os padrões evolutivos. Modificado de Bennet (2004).

nível	periodicidade (anos)	escala principal	causa	processo evolutivo
1	20.000	milenar deglacial	seleção natural	mudança microevolutiva intraespecífica
2	20.000 - 100.000	orbital	forçameto orbital	ruptura de comunidades, perda de mudança acumulada
3	1 - 10 milhões	tectônica	isolamento	especiação alopátrica
4	*ca*. 26 milhões	tectônica	extinção em massa	sobrevivência de espécies pós-gargalos de extinção (“sorting of species”)

No que se refere às dimensões temporais da biodiversidade em correspondência a estas escalas de mudança ambiental, evidência abundante e de extensão mundial indica que a vida na Terra tem respondido às mudanças climáticas em cada uma das escalas mencionadas (MILLAR e BRUBAKER, 2006). O clima de fato influencia a abundância e a distribuição das espécies, assim como a composição de comunidades, sendo que mudanças climáticas afetariam estes aspectos da vegetação com um retardo temporal, o qual seria determinado pelo tempo de geração, pela freqüência de perturbações e pela distância alcançada pelos propágulos de dispersão (CLARK *et al*., 1998; WEBB, 1986; WILLIAMS *et al*., 2002).

Neste sentido, em recente revisão da dinâmica da vegetação no Quaternário superior, Williams e colaboradores (2004) demonstraram que as respostas das plantas a mudanças ambientais ocorridas neste período foram grandes, complexas e englobaram várias escalas espaciais, temporais e de organização biológica.

Em escala milenar e em extensões regionais e subcontinentais, o controle climático sobre a mudança na vegetação é exercido em nível individual táxon-específico, resultando em alterações na distribuição e na abundância dos táxons (DAVIS, 1981; HUNTLEY e BIRKS

1983; HUNTLEY e WEBB, 1988; WEBB, 1988; WILLIAMS *et al*., 2004). Este comportamento individualizado das plantas surge em decorrência de diferenças intertaxonômicas de tolerância climática, bem como de mudanças multivariadas no clima (WEBB, 1986; PRENTICE *et al*., 1991; JACKSON e OVERPECK, 2000; WILLIAMS *et al*., 2004).

A partir do nível individual inferior emergem as propriedades de ordem superior da vegetação, com as associações vegetacionais desenvolvendo-se em razão da intersecção dos táxons, sendo que associações surgem e desaparecem ao longo do tempo, inclusive com a ocorrência de tipos que não têm representação no presente (PRENTICE *et al*., 1991; OVERPECK *et al*., 1992; WILLIAMS *et al*., 2001; 2004).

Ascendendo em escala, as mudanças na distribuição dos táxons acabam também por alterar a fisionomia da vegetação em escalas continentais e globais, com biomas emergindo, desaparecendo e variando em composição no tempo e no espaço, ainda que com redistribuição espacial de menor amplitude do que as detectadas para táxons e associações (WILLIAMS *et al*., 2004). Tais modificações de ordem superior na estrutura da vegetação, que são mapeadas como alterações na distribuição dos tipos funcionais de plantas e dos biomas, provocam alterações nas propriedades físicas da superfície terrestre, modulando as trocas de energia, umidade e carbono entre a atmosfera e a vegetação (FOLEY *et al*., 1994; 2000; HARRISON *et al*., 1995; KUTZBACH *et al*., 1996; PIELKE *et al*., 1998; WILLIAMS *et al*., 2004).

Em resumo, as explanações acima elencadas parecem sugerir que, para um melhor entendimento dos padrões e processos associados à distribuição da biodiversidade, torna-se fundamental a análise de outras escalas temporais além da presente.

5.1.2. MUDANÇAS AMBIENTAIS NO QUATERNÁRIO E O IMPACTO NA DISTRIBUIÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Se toda a história de nosso planeta fosse representada em um único dia, o *Quaternário* seria equivalente aos últimos 30 segundos daquele dia. Contudo, ainda que represente apenas 0,04% dos 4600 milhões de anos decorridos desde a formação da Terra, o Quaternário representa um dos períodos mais dramáticos de mudanças ambientais na história do planeta (ANDERSON *et al*., no prelo). Dentro deste breve período, que engloba aproximadamente os últimos 1,8 milhões de anos, ocorreram imensas mudanças climáticas e ambientais, as quais influenciaram profundamente o mundo atual, tanto em termos da configuração de paisagens físicas quanto da distribuição de biodiversidade. Além disto, o Quaternário é mais ou menos equivalente ao tempo em que o homem está presente na Terra, sendo que neste restrito período geológico nossa espécie difundiu-se sobre a superfície do planeta e atualmente representa um dos mais poderosos agentes de mudança ambiental (GOUDIE, 2006).

Esta janela de tempo conhecida como Quaternário é composta por duas séries distintas, o *Pleistoceno* e o *Holoceno*, sendo que a primeira compreende a maior parte do período. O Holoceno corresponde a uma série muito curta e recente no tempo geológico, englobando os últimos 11.500 anos, cuja identidade deve-se ao desenvolvimento da agricultura e da civilização, que marcaram este recorte temporal (ANDERSON *et al*., no prelo).

O Quaternário foi pontuado por cerca de 20 avanços e recuos glaciais, sendo que no hemisfério norte o gelo invadiu latitudes temperadas da América do Norte e Eurásia, enquanto no hemisfério do Sul, montanhas glaciais cresceram em vastas proporções. Com os avanços e recuos do gelo, as áreas costeiras passaram por fases alternadas de exposição e submersão, abrindo e fechando corredores de dispersão em escala continental, como por exemplo, entre a Eurásia e a América do Norte (BARNOSKY, 2005). Acompanhando estas modificações

físicas na paisagem, ocorreram mudanças climáticas em parâmetros marcantes como a temperatura média anual ou a precipitação em certas áreas, além de modificações mais sutis como mudanças em sazonalidade, em padrões de circulação atmosférica e oceânica, em atividade das monções, em trajetos de tempestades e em assembléias vegetacionais (RUDDIMAN *et al*., 1989; DANSGAARD *et al*., 1993; RAYMO, 1997, 1998; RAYMO *et al*., 1997, 1998; KUTZBACH *et al*., 1998; CLARK *et al*., 1999; PETIT *et al*., 1999; SCHMIEDER *et al*., 2000; RUDDIMAN, 2001; BARNOSKY, 2005). Fato notável é que estas mudanças foram relativamente rápidas em relação a padrões geológicos, ainda que possam ser consideradas lentas em termos de tempo ecológico. Neste sentido, mesmo considerando apenas os últimos 20.000 anos, grandes mudanças ambientais puderam ser registradas: a área coberta por geleiras foi reduzida a um terço da que havia no máximo glacial; as águas liberadas por este degelo elevaram os níveis oceânicos em mais de cem metros; os blocos de massas terrestres, liberados do peso do gelo, sofreram soerguimentos locais de várias centenas de metros; os cinturões de vegetação deslocaram-se pelo equivalente a dezenas de graus de latitude; terras permanentemente congeladas recuaram em extensas áreas da Europa; a floresta tropical expandiu-se; campos de areia desérticos avançaram e recuaram; lagos interiores extravasaram e encolheram (ANDERSON *et al*., no prelo).

No que se refere à biodiversidade, todos os aspectos da distribuição de vegetação no Quaternário sofreram mudanças extensas e repetidas em respostas ao forçamento orbital sobre as oscilações climáticas, o CO_2 atmosférico e a extensão de geleiras que foram característicos do período (WILLIAMS, no prelo). Tais modificações incluíram aspectos desde a distribuição geográfica e a abundância de espécies individuais até a posição global, extensão e composição das principais formações vegetacionais. Em escalas temporais de séculos e de mais longo prazo, a distribuição e a abundância de espécies de plantas seguiram de perto o trajeto das mudanças climáticas, através da dispersão de propágulos para regiões recentemente

favoráveis, de modificações locais em abundância populacional e de extinção de populações em locais desfavoráveis. Como já mencionado anteriormente, a partir destas respostas em nível de espécie emergiram os padrões de distribuição das formações vegetacionais e dos biomas (WILLIAMS *et al*., 2004; WILLIAMS, no prelo).

Neste sentido, como sublinhado por Williams (no prelo), pode-se dizer que a distribuição atual da biodiversidade e a estrutura genética do presente são em parte um legado da história das migrações, colonizações e extinções experimentadas pelas espécies no Quaternário superior.

No Brasil, os estudos de reconstrução paleoambiental (vegetação e clima), cujo desenvolvimento mais intenso iniciou a partir da década de 1990, verificaram a complexidade das associações vegetacionais com mudanças climáticas, sendo observadas significativas variações climáticas durante o Quaternário tardio (LEDRU *et al*., 1996; 1998; PESSENDA *et al*., 2004; SAIA, 2006). De maneira geral, os estudos para a região sul, sudeste e central do país indicaram que de ~30.000 a ~18.000 anos A.P. o clima apresentou-se mais frio e úmido/seco que o atual, dependendo do local de registro. No intervalo entre ~18.000 e 10.000 anos A.P. observou-se uma ascenção gradativa da temperatura, com intervalos de fases secas e aumento gradual da umidade. Entre 10.000 a 4.000 anos verificou-se um clima mais quente e úmido que o do período anterior e subseqüentemente, a partir de 4.000-3.000 anos A.P. até o presente, um clima ainda mais úmido e similar ao atual ((LEDRU *et al*., 1996; 1998; PESSENDA *et al*., 2004; SAIA, 2006).

No caso dos ambientes costeiros, além destas mudanças climáticas propriamente ditas, cumpre destacar que os processos geológicos e geomorfológicos associados às mudanças de nível do mar ocorridas no Quaternário desempenham papel fundamental na gênese e distribuição dos ecossistemas.

Os principais fatores que definem a evolução das barreiras litorâneas são as respostas dos ambientes costeiros à velocidade de variação do nível relativo do mar, a relação entre o volume de sedimentos e a morfologia do substrato, definidor do espaço de acomodação, bem como a relação entre a energia de ondas e a amplitude das marés (COWELL *et al*., 1991; SWIFT e THORNE, 1991; ROY *et al*., 1994). Na costa brasileira, as oscilações do nível relativo do mar no Quaternário têm sido consideradas como o principal fator na construção das barreiras (SUGUIO e MARTIN, 1976; MARTIN *et al*., 1979; SUGUIO *et al*., 1985; VILLWOCK *et al*., 1986). Os estudos sistemáticos sobre paleoníveis marinhos da costa oriental do Brasil entre o Rio Grande do Norte e o Rio Grande do Sul iniciaram há mais de 35 anos, agregando mais de 1000 amostras datadas por rádio-carbono, as quais demostram uma tendência comum em termos de ascensão a um nível marinho máximo e superior ao atual no Holoceno médio, com uma queda subseqüente até o presente (ANGULO *et al*., 2006). Assim sendo, a formação de extensas barreiras regressivas na costa leste brasileira deve-se às oscilações do nível relativo do mar no Quaternário, em particular a descida de cerca de 3m após o máximo da transgressão pós-glacial ocorrido entre 7.000 e 5.000 anos A.P., associadas a balanços positivos de sedimentos (SOUZA, 2005; ANGULO *et al*., 2006).

Conseqüentemente, parece adequado supor que as mudanças ambientais ocorridas no Quaternário, sobretudo desde o Holoceno médio, assumem grande importância na configuração e na distribuição atual dos sistemas quaternários costeiros do Domínio da Mata Atlântica.

5.2. **Abordagem e motivação da pesquisa**

Ao longo de todo o litoral do Brasil, que se estende por cerca de 9000 km, encontra-se uma estreita franja constituída por terrenos de idade quaternária. Embora bem pouco significativa em termos de superfície total ocupada, esta faixa apresenta uma heterogeneidade de unidades de paisagem deveras surpreendente, mesmo quando analisada em pequenos trechos. Esta profusão de ambientes distintos em curto espaço geográfico e com disposição tão intrincada é o motivo pelo qual, via de regra, são tratados em conjunto como "complexo" ou "mosaico" de comunidades vegetacionais. Em boa parte também explica a variedade de abordagens adotadas pelos diversos autores que trabalharam com estes tipos de vegetação, como já apontado por SILVA (2001), alguns apresentando análises muito detalhistas com baixo poder de generalização e outros com tratamentos muito sintéticos e com pouco poder de explicação, fato que até hoje dificulta o consenso e o entendimento dos sistemas quaternários litorâneos. A grosso modo, estes dois tipos de estratégias correspondem a abordagens uniescalares cujo foco restringe-se, respectivamente, apenas a uma escala local de alta resolução, mas com extensão territorial bastante reduzida ou somente a uma escala global de ampla extensão geográfica, porém com resolução grosseira.

O desenho de uma abordagem adequada para compreender a gama de formações vegetacionais ocorrentes na zona costeira, que é ímpar por sua grande heterogeneidade ambiental, deveria, em primeiro lugar, apresentar uma estratégia que integrasse tanto os componentes bióticos do ambiente (flora, fauna e microorganismos) quanto aqueles abióticos (clima, solos, formas de relevo, substrato geológico), bem como a interação entre os mesmos. Deste modo, os determinantes físico-ambientais não seriam mais considerados como variáveis

externas em qualquer modelo de interpretação da estrutura, função e distribuição dos referidos sistemas: o ambiente físico faria parte destes.

Em segundo lugar, deve-se considerar o fato de que os componentes abióticos e bióticos dos ambientes quaternários costeiros apresentam uma dinâmica bastante movimentada, com oscilações e respostas tipicamente não-lineares e complexas oriundas dos processos sedimentares (FLETCHER III, 1999). Os ambientes costeiros são extremamente dinâmicos, sendo que neles convergem processos terrestres, oceânicos e atmosféricos, que alteram constantemente suas características (ANGULO, 2004).

Por conseqüência, uma abordagem adequada para entender estes sistemas deveria abranger diferentes escalas espaciais e temporais, englobando desde escalas locais atuais e históricas, que possibilitam avaliar a dinâmica natural recente e o impacto da ação antrópica, até escalas regionais e milenares, que permitem compreender o arcabouço geológico e a evolução das zonas costeiras após a última grande glaciação.

Não obstante, a maior parte dos registros empregados para avaliar mudanças nos ecossistemas baseiam-se em dados ecológicos de curto prazo ou em imagens de satélite que abrangem apenas poucas décadas (WILLIS e BIRKS, 2006). Cabe então destacar a importância de registros paleoecológicos (*e.g.* amostras preservadas de pólen, sementes, frutos, anéis de árvore, carvão vegetal e partes remanescentes de animais), que datam de dezenas a milhões de anos e podem fornecer valiosas perspectivas de longo prazo sobre a dinâmica de sistemas ecológicos contemporâneos. Embora no passado tenham sido considerados demasiado descritivos e imprecisos, o avanço das paleociências nas últimas décadas vem produzindo crescente informação em termos de registros paleoecológicos, cujas resoluções espaciais e temporais mais refinadas equivalem ao detalhe de boa parte dos registros atualmente utilizados em pesquisas sobre conservação de biodiversidade (WILLIS e BIRKS, 2006).

Assim sendo, parece evidente que a observação e a modelagem de processos sedimentares, de evolução morfodinâmica do substrato, bem como de registros estratigráficos e paleoambientais, constituem ações de grande importância em qualquer estratégia para entender as interrelações específicas de processos e respostas dentro de ambientes costeiros (FLETCHER III, 1999). Ressalta-se que a realização de estudos de reconstrução pretérita dos ambientes quaternários costeiros adquire especial relevância no panorama atual, neste momento em que a temática das mudanças globais - variações climáticas, aquecimento global, aumento do nível do mar, bem como todas as implicações correlacionadas - torna-se uma preocupação crescente para todos os atores sociais.

Em linha com as considerações acima apontadas, este capítulo apresenta uma abordagem dirigida ao entendimento da gênese e configuração dos sistemas vegetacionais quaternários do litoral brasileiro, desenvolvida em uma concepção multiescalar e de inclusão dos fatores abióticos.

O presente estudo procura fornecer uma visão ampla, ainda bem preliminar, da gênese destes sistemas vegetacionais em termos dos fatores condicionantes gerais e da escala temporal envolvida na formação dos mesmos. Neste capítulo a abordagem transita das escalas temporais atual e histórica para alcançar as escalas milenar deglacial e orbital do pretérito geológico.

Para tanto, o foco inicial do estudo dirige-se a uma escala sinóptica global abrangendo a faixa litorânea brasileira, onde um modelo conceitual de gênese dos sistemas vegetacionais de ambientes quaternários é elaborado para cada tipo de ambiente de acumulação.

Este modelo de gênese procura contribuir para explicar e predizer a distribuição espacial destes sistemas, assim como as suas características mais relevantes. É claro que tal propósito não é fácil de ser atingido, tendo em vista a escassa informação disponível e o elevado grau de antropismo incidente sobre a faixa litorânea, zona que apresenta o mais longo

e intenso histórico de povoação do país, o que dificulta estabelecer até que ponto algumas das feições hoje presentes nestes sistemas são produto de processos naturais ou de processos antrópicos acontecidos durante os séculos mais recentes. Para superar esta dificuldade, assume-se como pressuposto que sistemas vegetacionais que compartilham processos de evolução similares apresentam, também, feições estruturais e funcionais igualmente similares, caso contrário poderíamos postular que tais diferenças seriam conseqüência da influência antrópica sobre os mesmos.

Neste sentido, as predições de distribuição espacial derivadas do modelo elaborado na visão global são subseqüentemente avaliadas na escala de paisagem regional e local, em recortes localizados na região mais preservada dos sistemas quaternários costeiros da Mata Atlântica. Conforme demonstrado no capítulo anterior (cap. 4), esta porção corresponde à região litorânea entre o norte de Santa Catarina e o sul de São Paulo, que foi adotada como região foco deste estudo.

Na última etapa, em escala de paisagem local são desenvolvidos esboços de evolução paleogeográfica dos ambientes costeiros de dois setores representativos da região foco: a península de Superagüi (PR) e a planície de Itapoá (SC). Neste último setor, reconstruções geológicas-geomorfológicas em associação com informação paleocológica derivada de análises de pólen são empregadas na elaboração de um quadro evolutivo dos sistemas vegetacionais ao longo do Quaternário.

Por fim, cabe destacar que não é objetivo deste capítulo apresentar um novo sistema de classificação, mas sim uma abordagem para avaliar e interpretar os ambientes quaternários levando em conta suas interações e dinâmicas, no sentido de contribuir para o entendimento da heterogeneidade e variabilidade tão peculiar das áreas vegetadas na região do quaternário litorâneo.

5.3. Objetivos da pesquisa

- Desenvolver um ensaio sobre o panorama dos ambientes quaternários costeiros do leste brasileiro em termos de condicionantes físico-ambientais e de características vegetacionais.

- Elaborar o esboço de um modelo conceitual de gênese para os sistemas vegetacionais quaternários litorâneos brasileiros.

- A partir deste modelo geral, elaborar um modelo conceitual de gênese para cada tipo de ambiente de acumulação.

- Avaliar as predições de distribuição de sistemas vegetacionais quaternários litorâneos, derivadas dos modelos, em comparação a mapeamentos de vegetação e levantamentos botânicos realizados em escala regional e local.

- Fornecer um quadro da evolução paleogeográfica dos ambientes alvo na região do litoral sudeste entre o norte de Santa Catarina e o sul de São Paulo, na janela temporal desde o Pleistoceno até o presente.

- Nesta janela temporal, desenhar um esboço de reconstrução paleoecológica da história dos sistemas vegetacionais dentro destes ambientes alvo.

5.4. Hipóteses da pesquisa

Hipótese 1: *Sobre o modelo conceitual de gênese dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros do Brasil.*

1 - H_0: O modelo de gênese baseado na premissa de que a vegetação, nos diferentes estádios de desenvolvimento do ecossistema, reflete as fases de construção do ambiente, não permite interpretar os mosaicos vegetacionais do litoral brasileiro.

1 - H_1: O modelo de gênese baseado na premissa de que a vegetação, nos diferentes estádios de desenvolvimento do ecossistema, reflete as fases de construção do ambiente, permite interpretar os mosaicos vegetacionais do litoral brasileiro.

Hipótese 2: *Sobre a distribuição dos sistemas vegetacionais do quaternário costeiro do Brasil e sua associação aos substratos geológico-geomorfológicos.*

2 - H_0: A distribuição dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros do Brasil não está associada ao substrato de formação dos ambientes, não sendo esperada a correlação entre os temas vegetação e geologia-geomorfologia.

2 - H_1: A distribuição dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros do Brasil está associada ao substrato de formação dos ambientes, sendo esperada a correlação entre os temas vegetação e geologia-geomorfologia.

Hipótese 3: *Sobre a distribuição geográfica de sistemas vegetacionais atuais em ambientes quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica e a evolução paleogeográfica dos terrenos.*

3 - H_0: A distribuição geográfica de sistemas vegetacionais atualmente presentes em ambientes quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica não se apresenta correlacionada à configuração de terrenos definida a partir do Holoceno Médio, assim como não se apresenta influenciada por mudanças de nível marinho.

3 - H_1: A distribuição geográfica de sistemas vegetacionais atualmente presentes em ambientes quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica apresenta-se correlacionada à configuração de terrenos definida a partir do Holoceno Médio, com grande influência de mudanças de nível marinho.

Hipótese 4: *Sobre a composição de sistemas vegetacionais atuais em ambientes quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica e sua história paleoecológica.*

4 - H_0: A composição de sistemas vegetacionais atualmente presentes em substratos quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica não se define a partir do Holoceno Médio.

4 - H_1: A composição de sistemas vegetacionais atualmente presentes em substratos quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica define-se a partir do Holoceno Médio.

Hipótese 5: *Sobre a eficácia da abordagem em múltiplas escalas espaciais e temporais*

5 - H_0: A abordagem multiescalar desenvolvida em Sistema Geográfico de Informação não permite transitar nas escalas temporais do presente ao pretérito geológico (Holoceno e Pleistoceno) e tampouco nas escalas espaciais desde a sinóptica global até a regional e local, de modo que não representa uma estratégia com bom potencial para auxiliar em análises sobre a evolução da distribuição de sistemas vegetacionais quaternários costeiros.

5 - H_1: A abordagem multiescalar desenvolvida em Sistema Geográfico de Informação permite transitar tanto nas escalas temporais do presente ao pretérito geológico (Holoceno e Pleistoceno), quanto nas escalas espaciais desde a sinóptica global até a regional e local,

representando uma estratégia com bom potencial para auxiliar em análises sobre a evolução da distribuição de sistemas vegetacionais quaternários costeiros.

5.5. Materiais e métodos

5.5.1. INVENTÁRIO DE FONTES BIBLIOGRÁFICAS E CARTOGRÁFICAS

O primeiro passo na elaboração dos modelos conceituais da gênese dos ecossistemas alvo consistiu em recolher os subsídios necessários a partir de dados e informação bibliográfica. Para tanto foi realizado um levantamento bibliográfico em dois blocos: um primeiro dirigido aos temas vegetação e geologia em substratos quaternários litorâneos do Brasil, com ênfase na região do litoral sudeste do norte do estado de Santa Catarina ao sul do estado de São Paulo, bem como um segundo focalizado sobre paleogeografia e palinologia desta faixa litorânea. As ferramentas de busca utilizadas foram as existentes no Portal de Periódicos da CAPES, incluindo os Bancos de Teses e Dissertações; no Google Acadêmico; bem como em outras bases bibliográficas relacionadas tais como ISI; CSA, ScienceDirect; CrossRef; Wilson Web; Scopus.

Em relação ao material cartográfico, efetuou-se um levantamento junto a instituições com atividades relacionadas à região supracitada, onde consultas presenciais foram efetuadas em bibliotecas e mapotecas de instituições de pesquisa (*e.g.* universidades etc.), órgãos governamentais (*e.g.* IBGE, INPE, IBAMA, CPRM, IAP, IEF, IPT, Secretarias Estaduais e Municipais etc.) e organizações não-governamentais (tab. 5.2). Extensas buscas virtuais foram também realizadas junto a portais de acesso a dados e bases espaciais na INTERNET.

Tabela 5.2. Documentos fotográficos e cartográficos utilizados como apoio.

DOCUMENTO	ESCALA	DATA	PRODUÇÃO
Cartas Topográficas	1:1.000.000 1:250.000 1:100.000 1:50.000	variadas	- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) - DSG (Diretoria de Serviços Geográficos - Ministério do Exército)
Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo	1:1.000.000	2004	- CPRM (Serviço Geológico do Brasil) - Programa Geologia do Brasil, folhas SI-22; SH-22; SG-22; SG-23; SF-23; SF-24; SE-24; SD-24; SC-24; SC-25; SB-24; SB-25; AS-23 e SA-24
Mapa de Vegetação	1:1.000.000	variadas	- Projeto RADAM Brasil, v. 21; 23; 24; 30; 32; 33 e 34
Mapa de Geologia	1: 250.000	inédito	- Projeto RADAM Brasil, v. 35 (esboço preliminar)
Mapa de Gemorfologia	1: 250.000	inédito	- Projeto RADAM Brasil, v. 35 (esboço preliminar)
Mapa de Pedologia	1: 250.000	inédito	- Projeto RADAM Brasil, v. 35 (esboço preliminar)
Mapa Geológico do Litoral Paulista - Folhas Cananéia e Iguape	1:100.000	1978	- Suguio (1978)
Mapa de Solos do Litoral do Paraná	1:50.000	inédito	Curcio (esboço preliminar)
Mapa do Cenozóico do Litoral do Estado do Paraná	1:100.000	2004	- Angulo (1992; 2004)
Mapa do Cenozóico do Litoral do Estado do Paraná	1:50.000	2004	- Angulo (2004)
Mapa da Planície Costeira do Litoral Norte de Santa Catarina	1:50.000	2004	- Angulo e Souza (2004)
Fotografias aéreas (estereopares)	1:25.000	1953	- Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul - S.A..
Fotografias aéreas (estereopares)	1:70.000	1962	- Aerosul Levantamentos Aeroespaciais e Consultoria S.A.
Fotografias aéreas (estereopares)	1:25.000	1980	- Aerosul Levantamentos Aeroespaciais e Consultoria S.A. - IAP (Instituto Ambiental do Estado do Paraná)

5.5.2. ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO DE GÊNESE DOS SISTEMAS ALVO

Tomando como base os dados e informações bibliográficas e cartográficas reunidos na etapa anterior, bem como um esboço desenhado anteriormente (LORINI *et al*., 2003), elaborou-se um modelo conceitual de gênese dos sistemas vegetacionais quaternários litorâneos, para cada tipo de ambiente de acumulação.

Para avaliar se a distribuição real dos sistemas vegetacionais quaternários litorâneos corrobora aquela prevista pelo modelo conceitual de gênese, selecionou-se como estudo de caso o setor mais preservado destes tipos de sistema, que consiste na região litorânea entre norte de SC e sul de SP (ver Capítulo 4). Nos procedimentos de avaliação empregou-se duas estratégias, que são abaixo descritas.

5.5.2.1. Cruzamento entre os mapeamentos de vegetação e de geologia

A primeira etapa consistiu em elaborar o mapa geológico da região litorânea entre o norte de SC e sul de SP (fig. 5.2), que foi realizada pela composição dos mapeamentos geológicos do litoral norte de Santa Catarina, do litoral do Paraná e do litoral sul de São Paulo, publicados respectivamente por ANGULO e SOUZA (2004), ANGULO (2004) e SUGUIO (1978). O mosaico destes mapeamentos geológicos foi efetuado após adequação das legendas e compatibilização das feições nas áreas limítrofes.

Adicionalmente, como a área do Ariri no litoral sul de São Paulo não estava representada nos mapas existentes, as feições geológicas desta porção foram mapeadas com base na interpretação de imagens Landsat-7/ETM+. Este procedimento foi efetuado com a orientação do Dr. Rodolfo José Ângulo, do Laboratório de Estudos Costeiros, Departamento de Geologia da UFPR.

Figura 5.2. Mapa geológico do quaternário costeiro do litoral norte de SC ao sul de SP.

700000 750000 800000 850000 900000

7300000 7250000 7200000 7150000 7100000

SP

PR

SC

Ilha Comprida

Ilha do Cardoso

Ilha de Superagüi

Baía de Paranaguá

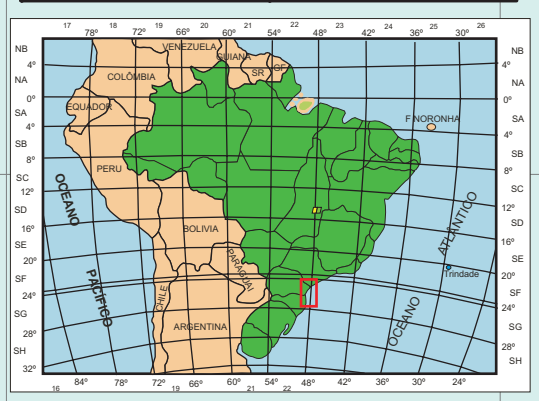
Baía de Guaratuba

Baía de São Francisco

N W E S

Sistema de Projeção Cartográfica: UTM
Elipsóide: SAD69
***Datum*: SAD69**

0 25.000 50.000 m



Legenda

pCi - Embasamento Cristalino pré-Cenozóico

M - Coberturas Mesozóicas

Unidades Cenozóicas Continentais

Tp - Formação Pariqüera-açu (Mioceno)

Tm - Formação Mina Velha (Mioceno Inferior)

Ta - Formação Alexandra (Mioceno Inferior)

TQl - Leques e cones aluviais Plio-Pleistocênicos

Ql - Leques, tálus e colúvios (Quaternário indiferenciado)

Qa - Terraços e planícies aluviais (Quaternário indiferenciado)

Unidades Cenozóicas Costeiras

QPpc - Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Pleistocênicos

QHpc - Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Holocênicos

QAp - Praias atuais

QHpe - Planícies paleoestuarinas

QAm - Planícies de maré atuais

QAfr - Fundos rasos atuais

SL - Superfície liquida

Limite Estadual

Título

Mapa Geológico

Instituição

Programa de Pós-Graduação em Geografia
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Sistema

VistaSAGA - UFRJ
Sistema de Análise Geo-Ambiental

Autor(a)

Maria Lucia Lorini

Apoio

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CAPES

PETROBRAS

Em uma segunda etapa, efetuou-se a comparação deste mapa geológico construído (fig. 5.2) com o mapa de cobertura do solo (fig. 4.15) descrito no capítulo anterior. Através de operação de cruzamento dos dois mapas, obteve-se a planimetria conjunta e computou-se o coeficiente V de Cramer. Maior informação sobre este coeficiente pode ser encontrada em Ott *et al*. (1983).

A estatística V de Cramer representa um coeficiente de correlação utilizado para comparações de variáveis nominais, cujo cálculo baseia-se no Qui-quadrado, segundo a fórmula abaixo:

$$V = V(X,Y) = \sqrt{\frac{\chi^2}{n \min(M-1, N-1)}}.$$

, onde

X e **Y** são as variáveis categóricas comparadas;

M são as distintas categorias de X, nomeadas X_1, ...X_M;

N são as distintas categorias de Y, nomeadas Y_1, ...Y_M;

n são os pares de observações (x_k, y_k) tomadas, onde x_i pertence a uma das M categorias em X e y_i pertence a uma das N categorias em Y.

O coeficiente V de Cramer varia de 0 até 1, que respectivamente indicam ausência de correlação entre as variáveis ou perfeita correlação.

5.5.2.2. Comparação com levantamentos botânicos

A segunda estratégia empregada consistiu em testar a verdade terrestre da distribuição dos sistemas vegetacionais alvo prevista pelo modelo conceitual, com base na comparação entre levantamentos botânicos de campo e a gênese dos terrenos quaternários.

O setor de teste selecionado para esta etapa foi a península de Superagüi, no município de Guaraqueçaba, litoral norte do Paraná, tendo em vista ser esta a única área em que existe levantamento de formações vegetacionais ao longo do gradiente dos terrenos quaternários, desde a praia até o embasamento cristalino, representado pelo trabalho de Jaster (1995), bem como informação espacializada em detalhe sobre o arcabouço geológico (ANGULO, 1992; LORINI, 1997).

5.5.3. ESBOÇO DA EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA DOS SISTEMAS QUATERNÁRIOS COSTEIROS

Para fornecer um panorama da evolução paleogeográfica dos ambientes quaternários costeiros, onde estão inseridos os sistemas vegetacionais de que trata o presente estudo, um esboço das fases evolutivas dos terrenos quaternários foi desenvonvolvido para dois setores da região entre o norte de SC e o sul de SP.

O primeiro destes dois setores corresponde à península de Superagüi (município de Guaraqueçaba, litoral norte do Paraná) e o segundo à planície de Itapoá (município de Itapoá, litoral norte de Santa Catarina), os quais representam planícies desenvolvidas, respectivamente, na ausência e na presença de ilha barreira, que formam os dois padrões encontrados na região. O esboço de evolução paleogeográfica elaborado baseou-se em Angulo (1992) e Lorini (1997), para a península de Superagüi, assim como em Souza (1999) e em Behling e Negrelle (2001) para a planície de Itapoá.

5.6. Resultados e discussões

Os resultados e discussões deste capítulo estão estruturados em duas partes principais, referentes, respectivamente, aos esboços dos modelos de gênese dos ambientes e da evolução paleoambiental dos sistemas quaternários costeiros.

A primeira parte compreende três blocos, iniciando por um ensaio sobre aspectos dos condicionantes físico-ambientais e vegetacionais dos sistemas quaternários costeiros do Brasil. O bloco seguinte apresenta o modelo conceitual de gênese geral e os modelos derivados, esboçados para cada tipo de ambiente de acumulação. O terceiro bloco trata da distribuição dos sistemas vegetacionais alvo, conforme prevista pelo modelo conceitual para o estudo de caso da região do litoral norte de SC ao sul de SP, bem como sua avaliação com base na comparação com os mapeamentos e com a verdade terrestre.

A segunda e última parte apresenta o esboço da evolução paleoambiental nos dois setores destacados na região estudada: a península de Superagüi (atualmente uma ilha artificial do litoral norte do Paraná) e a planície de Itapoá (litoral norte de Santa Catarina).

5.6.1. ASPECTOS AMBIENTAIS DOS SISTEMAS QUATERNÁRIOS DO LITORAL DO BRASIL

5.6.1.1. Aspectos físicos dos sistemas litorâneos

O litoral brasileiro, com seus cerca de 9000km de extensão, apresenta uma divisão em cinco regiões fisiográficas clássicas, as quais foram definidas por Silveira (1964) com base principalmente em elementos geológicos, oceanográficos e climáticos (figura 5.3). Ainda que esta divisão seja bastante genérica e abrangente, a mesma tem sido adotada com algumas

adições e/ou modificações por vários autores (*e.g.* SUGUIO e TESSLER,1984; SUGUIO e MARTIN, 1987; VILLWOCK, 1994), sendo constituída pelos cinco setores seguintes:

(1) *Litoral Amazônico ou Equatorial*: compreende o trecho desde a foz do rio Oiapoque até o Maranhão oriental, apresentando como principal característica a ocorrência de extensas áreas de manguezal.

(2) *Litoral Nordestino ou de Barreiras*: estende-se da foz do rio Parnaíba ao Recôncavo Baiano e tem como principais características a presença de depósitos sedimentares da Formação Barreiras, as falésias e arenitos de praia, os recifes de coral e extensas áreas com dunas de grande porte.

(3) *Litoral Oriental*: limita-se do Recôncavo Baiano até o sul do Espírito Santo, com muitas características comuns ao litoral nordestino, mas com o aparecimento das escarpas da Serra do Mar, ainda relativamente interiorizadas e que atingem a costa próximo a região de Vitória.

(4) *Litoral Sudeste ou das Escarpas Cristalinas*: trecho que se estende do sul do Espírito Santo ao Cabo de Santa Marta, em Santa Catarina, tendo como principais aspectos físicos a proximidade das escarpas cristalinas da Serra do Mar ao oceano; a presença de grandes reentrâncias na linha de costa, correspondentes a baías mais ou menos preenchidas por sedimentos de origem diversa; bem como algumas lagunas com extensão e grau de sedimentação variáveis

(5) *Litoral Meridional ou Subtropical*: abrange o trecho do litoral que vai do Cabo de Santa Marta, na região de Laguna, até a desembocadura do rio Chui, no limite do Brasil com o Uruguai, apresentando como características marcantes o clima subtropical e a ocorrência de amplas planícies sedimentares arenosas associadas a um conjunto de lagunas com diferentes níveis de comunicação com o oceano.

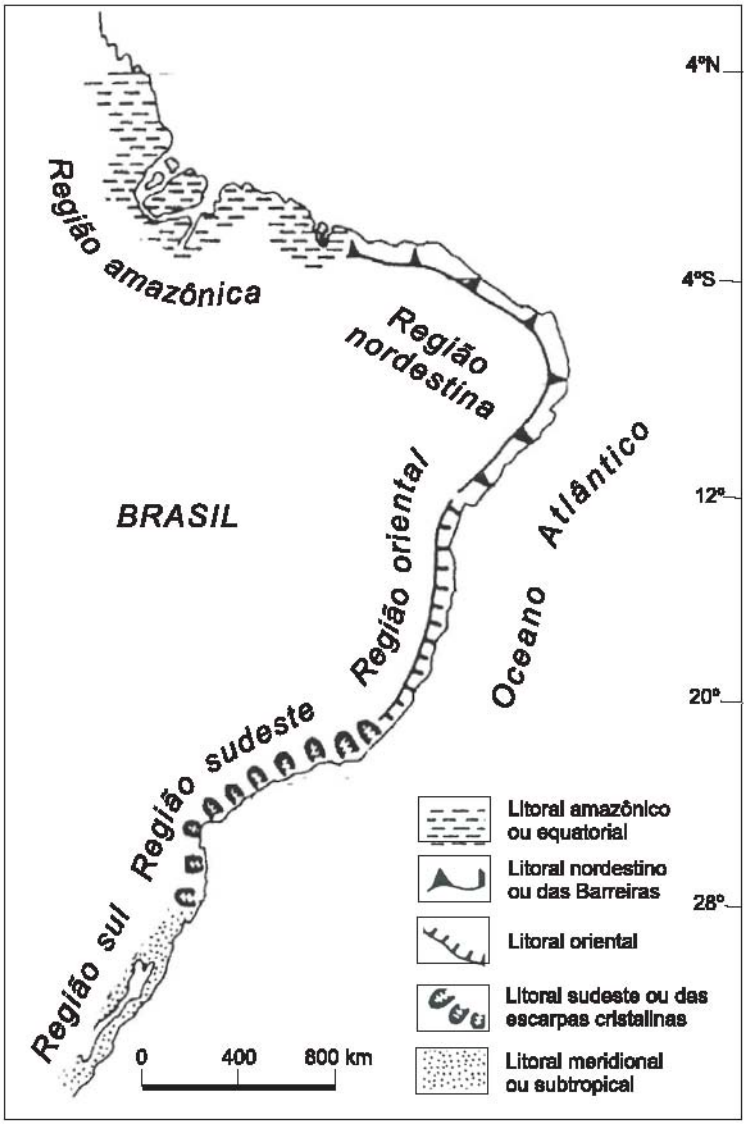


Figura 5.3. Subdivisão clássica do litoral brasileiro, baseada em critérios oceanográficos, climáticos e continentais. Fonte: Adaptado de SILVEIRA (1964).

Um outro arranjo de compartimentos do litoral brasileiro foi apresentado por Muehe (1998), que seguiu critérios de orientação e alinhamento da costa; formas da plataforma costeira interna e antepraia; clima de ondas; transporte litorâneo e amplitude da maré. A descrição dos setores costeiros propostos é extensamente provida por este autor, bem como uma discussão sobre os critérios da divisão.

Em cada um dos grandes setores reconhecidos para a costa brasileira ocorrem as *planícies costeiras*, definidas como superfícies geomorfológicas deposicionais de baixo gradiente, formadas por sedimentação predominantemente subaquosa, que margeiam corpos de água de grandes dimensões, como o mar ou oceano (SUGUIO, 2000). Também conhecidas como *baixadas* ou *planícies litorâneas*, estas superfícies são constituídas por sedimentos terciários e sobretudo quaternários, estando freqüentemente associadas a desembocaduras de grandes rios e/ou reentrâncias na linha de costa, podendo estar intercaladas por falésias e costões rochosos de idade pré-cambriana, sobre os quais assentam-se eventualmente seqüências sedimentares e vulcânicas acumuladas em bacias paleozóicas, mesozóicas e cenozóicas (VILLWOCK, 1994). Cabe destacar que ao longo do litoral brasileiro, especialmente em sua porção sudeste e sul, uma das feições mais marcantes corresponde às planícies costeiras formadas pela justaposição de cordões litorâneos, também denominadas de *restingas, feixes de restinga*, *terraços de construção marinha*, *antigos cordões praiais* ou *paleocordões* (BIGARELLA *et al*., 1978; MARTIN *et al*., 1988).

Retornando à gênese dos compartimentos costeiros, segundo Muehe (1998) são diversas as variáveis indutoras da forma como se organizam espacialmente os ambientes litorâneos: condicionantes geológico-geomorfológicos estão justapostos aos condicionantes de tipo oceanográfico e climático na evolução das formas de relevo costeiras. Sobre estas formas de relevo (terraços, planícies de cristas de praia, planícies deltaicas etc.) desenvolvem-se tipos de vegetação específicos que estabilizam o substrato sedimentar, em alguns casos incrementam a retenção de sedimentos e participam ativamente na pedogênese (SHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2000; BEHLING *et al.*, 2001). Contudo, esses processos de conformação dos sistemas vegetacionais podem cessar quando uma mudança climática (BEHLING, 1998) ou um processo de soerguimento ou subsidência tectônica altera o nível do mar e gera um

novo ciclo de gênese do relevo costeiro (SIEVER e PRESS, 1978; ANGULO e LESA, 1997; FRANCA-BARRETO *et al.*, 2002).

O mesoclima também tem destaque como um critério importante para interpretar a distribuição e a extensão dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros. Na faixa litorânea brasileira, quatro grandes compartimentos climáticos são delimitados: (a) zona de influência permanente das massas de ar tropical condicionadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que caracteriza a faixa quente e úmida do litoral da região norte; (b) zona onde estas massas de ar tropical têm um comportamento sazonal dependendo das mudanças anuais na direção dos alísios do leste e que, na faixa costeira, tem como expressão o litoral sub-úmido a semi-árido do Piauí e Maranhão; (c) faixa seca tropical-subtropical sob influência de células de alta pressão subtropicais e com alguns encraves úmidos de precipitação orográfica (litoral desde Ceará até Alagoas) e (d) zona onde estes encraves úmidos transformam-se em uma faixa contínua de precipitação orográfica nas vertentes orientais da Serra do Mar e das escarpas dos planaltos interiores (LAUER, 1989; NIMER, 1989).

Neste ponto é preciso notar que a presença da margem continental soerguida, em função do rift Mesozóico, que em alguns pontos continuou ao longo do Cenozóico (FRANCA-BARRETO *et al.*; 2002; GUNNELL, 1998), tem criado, na sua porção mais equatorial, uma zonação climática contrastante: um setor dominantemente úmido a *barlavento* e um outro semi-árido a *sotavento*, relativamente estáveis ao longo de todo o Quaternário, apesar das mudanças climáticas características deste período (GUNNELL, 1998).

Outro fator relevante é a proximidade das influências marítimas que são moderadoras da temperatura (NIMER, 1989; LEITE, 1995), possivelmente em função da corrente quente marinha do Brasil, que mantém condições tropicais no litoral em latitudes bem ao sul do Trópico de Capricórnio. Este fator permite a extensão de sistemas tipicamente tropicais (*e.g.* manguezais) até cerca de 28^{o} S, sendo que ao sul do cabo de Santa Marta, contudo, o

gradiente latitudinal de temperatura determina o limite norte das geadas ao nível do mar, que coincide com o limite sul deste tipo de sistemas costeiros (COSTA e DAVY, 1992; SHAEFFER-NOVELLI, 2000).

Desde o Pré-Cambriano a região hoje ocupada pelo Brasil tem sofrido vários ciclos de atividade tectônica intensa, sendo marcas disto faixas de dobramento remanescentes de ciclos orogênicos antigos, que circundam *greenstone belts* e terrenos granito-gnaissicos dos crátons da plataforma continental, bem como a estrutura de blocos falhados, soerguidos e/ou deprimidos, produzidos pela tectônica de fragmentação dos continentes, que formam respectivamente os afloramentos do escudo ou as bacias sedimentares de idades variáveis (MENDES-PIRES, 1998; AB´SABER, 1998). No litoral também é possível observar esta dinâmica de blocos de epirogênese positiva e negativa, processo que parece ter continuado ao longo do quaternário em certos locais (FRANCA-BARRETO *et al.*, 2002; FERNANDES e AMARAL, 2002). Esta dinâmica conjugada às mudanças glacio-eustáticas no nível do mar, de origem macroclimática, tem gerado áreas costeiras de aspecto afogado e outras onde as formas de acumulação marinha têm maior expressão (ANGULO e LESSA, 1997; MUEHE, 1998). É importante notar que, embora concordantes em alguns casos, a ação dos dois fatores que influenciam as mudanças no nível do mar (tectônicos e macroclimáticos) obedece a escalas temporais diferentes e, por conseguinte, determinam uma ampla gama de condições de evolução dos ambientes litorâneos.

Assim sendo, segundo SUGUIO (1985), o nível relativo do mar em determinado ponto do litoral constitui a resultante momentânea de interações complexas entre a superfície do oceano e do continente, das quais algumas têm efeitos sobretudo em escala mundial, como as modificações de volume das bacias oceânicas (tectono-eustasia) e as variações de volume dos oceanos (glacio-eustasia), enquanto outras atuam em escalas locais e regionais, como as variações da superfície do geóide (eustasia geoidal) e do nível dos continentes (movimentos

crustais e de blocos). O litoral brasileiro esteve sujeito a importantes variações do nível relativo do mar durante o Quaternário, cujas fases transgressivas e regressivas foram fundamentais na gênese dos ambientes costeiros. Apesar da variabilidade regional e local, segundo Suguio (2001) as duas últimas máximas transgressões ocorreram no Pleistoceno superior (*ca.* 123.000 anos A.P.) e no Holoceno médio (*ca.* 5.100 anos A.P.), quando o mar atingiu respectivamente 8 ± 2 m e 4,5 ± 0,5 m acima do nível atual. Posteriormente, cerca de 3.600 anos A.P., um outro nível máximo transgressivo foi atingido entre os 2 e 3,5 m. O atual processo de regressão começou após o último máximo, 2.800 anos A.P., para o qual se calcula um nível 1,5 a 2,5 acima do nível de hoje (SUGUIO, 2001). Faz-se necessário ressaltar, contudo, que a existência deste padrão das últimas transgressões holocênicas após a de 5.100 anos A.P. é ainda bastante questionada (ANGULO e LESSA, 1997; ANGULO *et al*., 2006). Em recente revisão dos estudos existentes sobre paleoníveis marinhos da costa leste brasileira, Angulo e colaboradores (2006) demonstram uma tendência comum indicativa de ascensão a um nível marinho máximo e superior ao atual no Holoceno médio, com uma queda subseqüente até o tempo atual.

Além das variações no nível relativo do mar, a gênese dos ambientes costeiros resulta da ação conjunta de fatores como as fontes, as condições de transporte e as armadilhas para ancoragem e retenção de sedimentos. A forma da plataforma interna e os processos mesoclimáticos, através da sua conseqüente circulação marinha, geram condições mais ou menos erosivas que, respectivamente, promovem a retrogradação ou a progradação das formas de relevo (STRAHLER e STRAHLER, 1973; MUEHE, 1998). A disponibilidade de sedimentos também influi para construir estas formas e segundo Warne *et al.* (2002) em áreas onde os sedimentos são de origem aluvial, a sazonalidade, a natureza e a quantidade destes sedimentos dependem de processos relativos à bacia de origem, como por exemplo no caso do litoral norte brasileiro, onde os sedimentos provêm principalmente da bacia amazônica

(NOGUEIRA-MORERA, 1977). Existem outras áreas onde a maior parte dos sedimentos são de origem local, seja por redisposição das areias da plataforma interna (MUEHE e CARVALHO, 1993; TURQ *et al.*, 1999) e/ou por erosão das formas de relevo próximas ao litoral, caso em que a natureza e a quantidade dos sedimentos dependem da litologia local (PRESS e SIEVER, 1978; MUEHE, 1998; DE PAULO e MOZETO, 2001). Uma discussão abrangente da maneira como todos estes processos conjugam-se para estabelecer padrões regionais de ambientes geomorfológicos no litoral brasileiro, pode ser encontrada em Muehe (1998).

5.6.1.2. Aspectos vegetacionais dos sistemas litorâneos

Em termos de vegetação os sistemas do litoral quaternário do Brasil estão incluídos sobretudo dentro da divisão denominada Áreas de Formações Pioneiras, segundo o Sistema Fitogeográfico Brasileiro de Veloso, adotado pelo IBGE (IBGE, 1992). Estes tipos de comunidade representam: (a) vegetação com infuência marinha, popularmente denominada vegetação de restinga; (b) vegetação com infuência fluviomarinha, incluindo manguezais, brejos de maré, marismas e campos salinos e (c) vegetação com influência fluvial e/ou lacustre, englobando comunidades popularmente conhecias como vegetação de várzea, brejos, pântanos e matas paludosas. Já os terrenos litorâneos quaternários mais estáveis e desenvolvidos apresentam vegetação de estrutura florestal, sobretudo as formações de Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas e Aluvial. Cumpre ressaltar que no sistema de Veloso (IBGE, 1992) o termo “pioneira” presente na categoria Áreas de Formações Pioneiras não foi cunhado para corresponder exatamente ao uso deste termo na visão clementsiana de sucessão das comunidades vegetais. Na concepção clementsiana, sob condições climáticas similares, tipos também similares de vegetação tendem a se implantar, passando estes por diversas fases de evolução (sucessão) até chegar ao tipo fisionômico melhor adaptado a tais

condições climáticas (tipo climáxico de vegetação) (PIANKA, 1982). Na verdade o termo *pioneiro* no sentido empregado por Veloso (IBGE, 1992) é utilizado sobretudo para caracterizar e enfatizar a natureza "pioneira" do ambiente no qual se encontra a vegetação.

Evidentemente, a vegetação de mangue, restinga ou os outros tipos de fisionomias dos sistemas quaternários litorâneos não são meras fases iniciais na sucessão da floresta ombrófila, idealmente o tipo climáxico da maior parte da região. A visão clementsiana é unidirecional e baseada, principalmente, no desenvolvimento, ao longo do eixo temporal, de sistemas cujo fator genético mais importante é o clima. Por outra parte, os sistemas vegetacionais das Áreas de Formações Pioneiras, embora influenciados pelo clima, têm como principal fator genético a geomorfologia, persistem em um local enquanto estejam ativos os processos geomorfológicos e a direcionalidade da sua evolução, caso seja possível observar alguma, em boa parte reflete a evolução destes processos geomorfológicos. No momento em que não é mais a morfogênese o condicionamento fundamental para a configuração do ambiente, os sistemas vegetacionais iniciam um processo de substituição por outros em que é a pedogênese o processo mais importante na formação do ambiente, podendo esta pedogênese obedecer de maneira mais marcante a qualquer um dos seus fatores de formação (clima, material de origem, hidromorfia e atividade biológica). Assim sendo, a palavra pioneira, por gerar confusão com as comunidades pioneiras do modelo clementsiano, talvez não seja o termo mais adequado para denominar este grupo de sistemas vegetacionais, sendo que para indicar o carácter aclimático destes sistemas de morfogênese ativa poderia ser mais adequado utilizar o termo formação edáfica ou azonal, denominações que também foram empregadas por Veloso (1982) para as suas formações pioneiras.

5.6.2. MODELO CONCEITUAL DA GÊNESE DOS AMBIENTES QUATERNÁRIOS COSTEIROS

Partindo da bibliografia disponível e de observações realizadas em campo e sobre produtos de sensoriamento remoto, as quais foram reunidas inicialmente em Lorini *et al*. (2003), apresenta-se a seguir uma série de modelos conceituais de evolução dos sistemas vegetacionais quaternários edáficos ou azonais, ou seja, aqueles situados em áreas de morfogênese ativa.

O modelo básico (fig. 5.4) representaria, a grosso modo, a dinâmica geral de qualquer processo geomorfológico de acumulação e construção de uma forma de relevo, acontecendo ao longo do tempo e do espaço, em função da energia do meio de transporte (a água, no caso dos modelados fluviais, fluviomarinhos e marinhos e o vento no caso do modelado eólico). Assim sendo, a energia seria a variável independente que determinaria a quantidade absoluta de material sendo transportado (Q), bem como da proporção de Q sendo depositada (D). Propõe-se que as duas variáveis dependentes, Q e D, juntam-se para determinar as maiores taxas de construção da forma de relevo ($T_{máx}$) em situações onde a energia do processo é suficientemente alta para que o meio de transporte ainda apresente um valor de Q apreciável, ao mesmo em que atinja um valor de D também alto. Se a energia for alta demais, D seria negligível, enquanto que com uma energia muito baixa, Q teria um valor próximo a zero. Sem dúvida este é um modelo simples que precisa ser ampliado, uma vez que não só a quantidade, mas também a granulometria e a natureza do material depositado tem influência sobre o comportamento do sistema vegetacional. Contudo, acredita-se que em um primeiro momento o modelo é suficiente para fornecer um arcabouço preliminar das bases geomorfológicas envolvidas na gênese dos sistemas vegetacionais quaternários do litoral brasileiro.

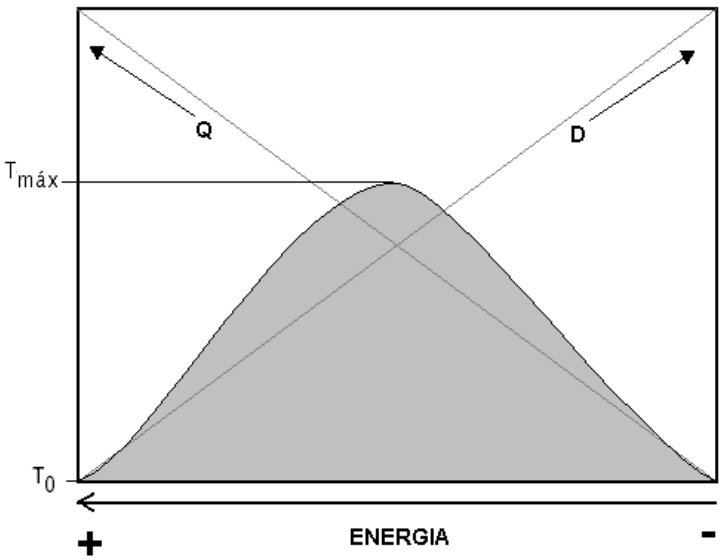


Figura 5.4. Modelo conceitual de formação do relevo nas planícies quaternárias do litoral. No eixo horizontal, a energia do processo morfogenético determina tanto a quantidade de material sendo transportado (Q), que atinge a sua maior expressão no canto esquerdo da figura, quanto a quantidade de material sendo depositado (D), que atinge o seu máximo no canto direito. A taxa máxima de formação do ambiente (T máx) corresponde à região do gráfico onde as linhas de Q e D se encontram, enquanto T_0 marca os pontos de início e término do processo morfogenético.

A hipótese central é que a vegetação, nos diferentes estádios de desenvolvimento do ecossistema, reflete as fases da construção do ambiente e que tal resposta é característica para cada tipo de ambiente de acumulação. Adicionalmente, variações nos estádios do desenvolvimento podem ocorrer segundo ocorram estresses hídricos e/ou térmicos.

5.6.2.1. Ecossistemas de ambiente de acumulação fluvial e/ou lacustre

O modelo apresentado para os sistemas vegetacionais de acumulação fluvial (fig. 5.5), é o mais simples, na medida em que a construção destes ambientes tem, em geral, um eixo espaço-temporal claramente definido pela dinâmica, mais ou menos freqüente e mais ou menos intensa, da inundação.

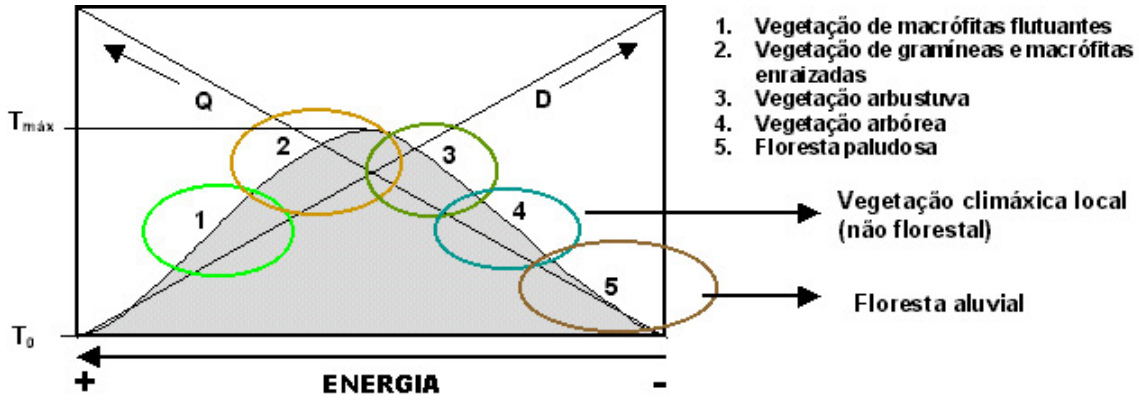


Figura 5.5. Modelo proposto de evolução dos sistemas vegetacionais em ambientes de acumulação fluvial, segundo a energia do processo morfogenético.

Os sistemas vegetacionais litorâneos relacionados ao processo de deposição fluvial constituiriam cinco compartimentos:

1) Vegetação de macrófitas aquáticas flutuantes, em locais com lâmina de água bastante expressiva;

2) Vegetação herbácea de macrófitas enraizadas e gramíneas, em setores cuja lâmina de água já sofre um rebaixamento ocasional;

3) Vegetação arbustiva de 1 a 5 m, cobertura esparsa a adensada conforme um gradiente de maior drenagem, mas ainda sob inundação significativa;

4) Vegetação arbórea entre 6 a 9 m, de cobertura esparsa ou formando dossel contínuo uniestratificado, em locais inundados boa parte do tempo;

5) Floresta paludosa de 10 a 15 m, formando dossel com pelo menos dois estratos arbóreos além de um arbustivo e um herbáceo, sob regime de inundação apenas periódica.

Interrompido o processo de inundação fluvial e ativado o domínio da pedogênese, a floresta paludosa evoluiria para um sistema arbóreo mais diversificado em espécies; multiestratificado, com estratos herbáceo, arbustivo e arbóreo bem desenvolvidos, inclusive um estrato de emergentes; com alturas de 25 a 30m, características estas resultantes da condição edáfica menos distrófica e livre de inundação. Nos compartimentos de planícies de inundação esta formação corresponderia à floresta aluvial e nas depressões intercordões à fácie hidromórfica da floresta de terras baixas.

Deste modo, uma vez finalizado o processo morfogenético, a substituição da floresta paludosa por uma floresta aluvial ou floresta de terras baixas proseguiria paralelamente com o desenvolvimento do solo para configurar um sistema ecológico climáxico típico. Contudo, na região semi-árida do nordeste, consideramos que os estágios finais difeririam daqueles do modelo típico, passando do estágio 4 para a vegetação climáxica local (*e.g*. estepe, savana), sem passar pelo estádio de floresta.

5.6.2.2. Ecossistemas de ambiente de acumulação fluviomarinha

Os ambientes de acumulação fluviomarinha são aqueles onde, caracteristicamente, o contato entre águas marinhas e fluviais gera uma massa de água salobra que, por sua vez, determina a floculação dos sedimentos finos transportados pelo rio (WARNE *et al*.., 2002). Estes sistemas, que genericamente recebem o nome de estuários, podem ser de vários tipos: deltaicos, lagunares ou estuarinos propriamente ditos (STRAHLER e STRAHLER, 1973).

Em qualquer uma destas três condições, a delimitação do fluviomarinho em relação ao fluvial não é muito evidente na medida em que o corpo de água aparece como um contínuo que responde às flutuações diárias da maré (fig. 5.6). Não obstante, os limites dos sistemas vegetacionais são claros e respondem nitidamente à influência das águas salobras e à floculação dos sedimentos finos em presença de sais.

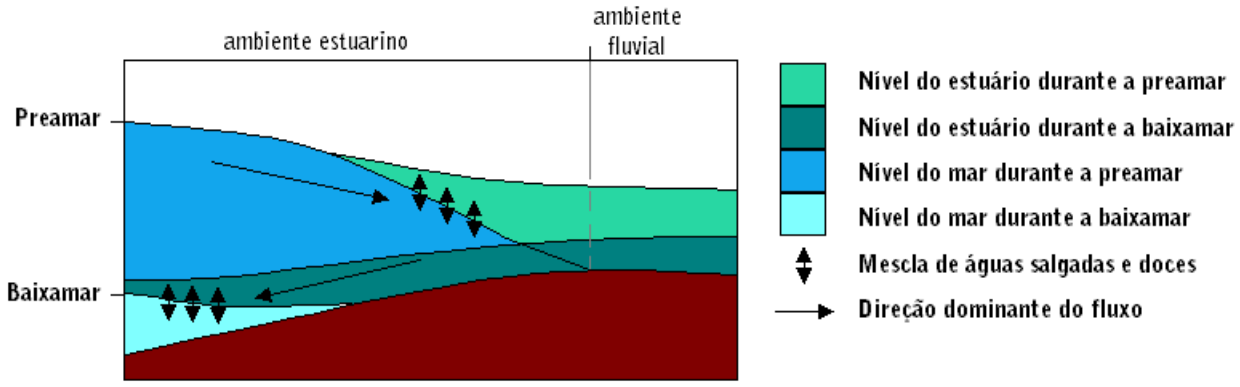


Figura 5.6. Perfil idealizado da influência da maré na determinação dos limites dos ambientes estuarino e aluvial em uma planície de maré. Nota-se que embora não atinja o setor fluvial propriamente dito da planície, a maré gera um aumento significativo na profundidade da coluna de água em todo o sistema ao barrar o fluxo de água do rio.

O modelo concebido para os sistemas vegetacionais de acumulação fluviomarinha (fig. 5.7) apresenta, na região tropical, três formações vegetacionais principais:

1) Vegetação herbácea dominada por gramíneas do gênero *Spartina*, as marismas, ocupando terrenos recém depositados, pouco consolidados e em boa parte cobertos pela maré.

2) Vegetação arbustivo-arbórea, os manguezais, ocupando as áreas entre a preamar de quadratura e a preamar de sizígia, apresentando, em regra geral, a seguinte seqüência: (2a) Manguezal dominado por *Rizophora*, sobre substratos pouco consolidados em franjas costeiras inundadas periodicamente pelas marés, em contato direto com o mar ou canais de maré, com salinidade méda a alta; (2b) Manguezal dominado por *Avicennia*, normalmente atrás das franjas costeiras e terrenos mais consolidados, com salinidade de baixa a muito alta; (2c) Mangue dominado por *Laguncularia*, em terrenos mais firmes e mais altos só atingidos pela preamar, com baixa salinidade. Os manguezais podem ser compostos por uma ou até três destas comunidades, conforme apresentem-se as condições supramencionadas.

3) Vegetação herbácea dominada por *Spartina sp.* e *Salicornia sp.*, por vezes caracterizada pela presença de *Cladium mariscus*, formações conhecidas como campos salinos, apicuns ou zona de *Cladium*, ocorrendo em locais submetidos a altas taxas de salinidade, em áreas onde a evapotranspiração excede a precipitação.

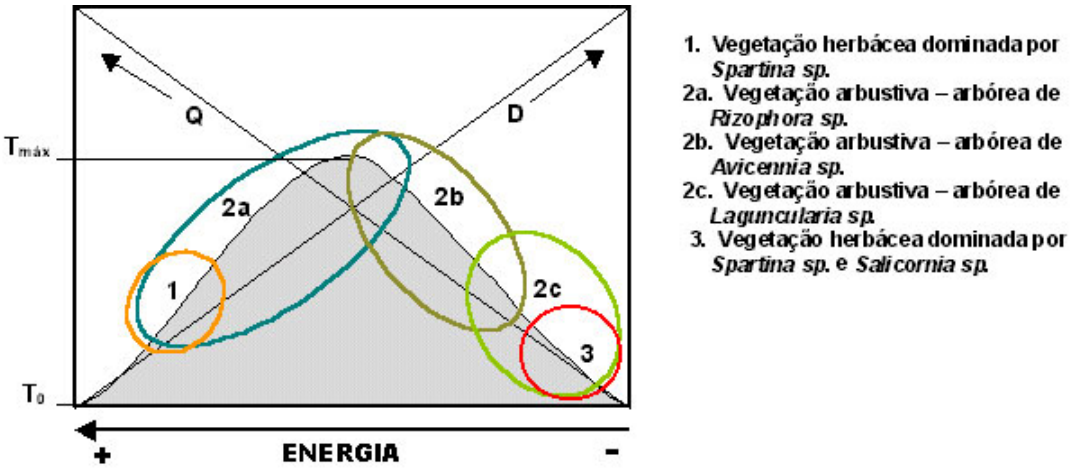


Figura 5.7. Modelo proposto de evolução dos sistemas vegetacionais em ambientes de acumulação fluviomarinha, segundo a energia do processo morfogenético.

Quando cessa o processo morfogenético ativo, os sistemas vegetacionais de acumulação fluviomarinha podem ser substituídos por sistemas morfogenéticos fluvial (e / ou lacustre) ou marinho (e / ou eólico), caso em que seguiriam os estádios de desenvolvimento aqui descritos para estes sistemas.

Nas latitudes equatoriais e tropicais, as formas características da vegetação dos sistemas vegetacionais fluviomarinhos são os manguezais, formados por um grupo de espécies arbóreas tropicais que possuem adaptações a diferenciadas condições de salinidade, inundação, anoxia e substratos argilosos não consolidados.

Na medida em que se avança no gradiente latitudinal, um tipo de vegetação diferente (marismas dominadas pela gramínea *Spartina* spp.) aparece ocupando a posição anteriormente dominada por *Rizophora*, até o ponto em que, ao sul da localidade de Laguna (SC), o sistema de manguezal é completamente substituído pelos sistemas de marismas (fig. 5.8) (SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2000).

Em termos da compartimentação litorânea definida por Muehe (1998), os sistemas tropicais de acumulação fluviomarinha expressam-se sobretudo na região norte, nos macrocompartimentos Amapá (de Cabo Orange a Cabo Norte-AP) e das Reentrâncias Pará-Maranhão (de Ponta Taipu-PA a Mangues Secos-MA), onde o transporte litoral da forte descarga sedimentar do rio Amazonas determina uma dinâmica de acresção do continente sobre a plataforma, na forma de "cabos lodosos" (*mudcapes*) nas bocas dos rios da região (MUEHE, *op. cit.*, 1998; WARNE *et al.*, 2002). No macrocompartimento Golfão Amazônico, porém, a descarga de águas doces do Amazonas faz com que o seu delta seja principalmente sub-aquático, limitando o desenvolvimento deste tipo de ecossistema (WARNE *et al.*, 2002).

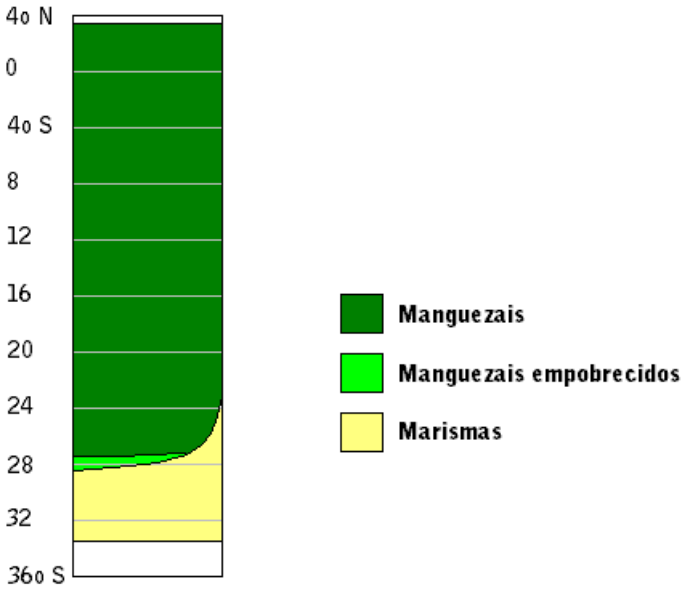


Figura 5.8. Distribuição latitudinal dos ecossistemas em ambientes de acumulação fluviomarinha. Os manguezais empobrecidos são aqueles que se encontram no limite de distribuição deste ecossistema, apresentando pouco desenvolvimento estrututural e onde já não ocorre o gênero *Rizophora*. Nesta faixa transicional as marismas já passam a dominar os ambientes fluviomarinhos.

Na região oriental entre Salvador e Ilhéus (BA), bem como no litoral sudeste, entre São Vicente (SP) e Ponta do Vigia (SC), os sistemas vegetacionais de acumulação fluviomarinha novamente adquirem expressividade espacial.

Já os sistemas de marismas atingem a sua maior expressão geográfica na região Sul, no macrocompartimento Sistemas de Laguna-Barreira do Rio Grande do Sul (de Torres a Barra do Chuí – RS), que se encontra no domínio climático temperado do país.

5.6.2.3. Ecossistemas de ambiente de acumulação marinha e eólica

Os ambientes designados como de acumulação marinha e eólica são aqueles formados pelo depósito de sedimentos arenosos que sofreram transporte, respectivamente, pela água do mar e pelo vento. As comunidades vegetacionais que ocorrem sobre estes ambientes são conhecidas pelo termo amplo de "restingas" (ARAÚJO, 1992) e caracterizam-se pela presença de um tipo distrófico de vegetação herbácea, arbustiva ou arbórea, com representação significativa de cactáceas, bromélias, palmeiras, clúsias e ericáceas.

Contudo, estas formações vegetacionais expressam desde sistemas onde o processo morfogenético acha-se realmente em curso até aqueles onde a pedogênese é o processo dominante. Assim, segregaremos aqui apenas os sistemas de morfogênese marinha e eólica ativa para compor estes dois modelos conceituais que serão apresentados em seqüência (fig. 5.9), tendo em vista as suas similaridades em termos de substrato, cobertura vegetal, bem como posterior evolução pedogenética.

O modelo conceitual relativo ao ambiente de deposição marinha ativa (fig. 5.9) comporta dois ecossistemas:

1) Vegetação de praia, composta de herbáceas halófilas e psamófilas reptantes, ocupando a pós-praia desde a escarpa praial até a base da duna ou cordão frontal, formando

estreita franja ocasionalmente inundada pela água do mar durante as marés mais altas ou de tormenta;

2) Vegetação de duna ou cordão frontal: (2a) formada pelas plantas acima citadas acrescidas de gramíneas, ocupando desde a base até a crista da duna ou cordão frontal; (2b) formação arbustiva fechada de 2 até 3 m, ocupando a crista e o reverso da duna ou cordão frontal.

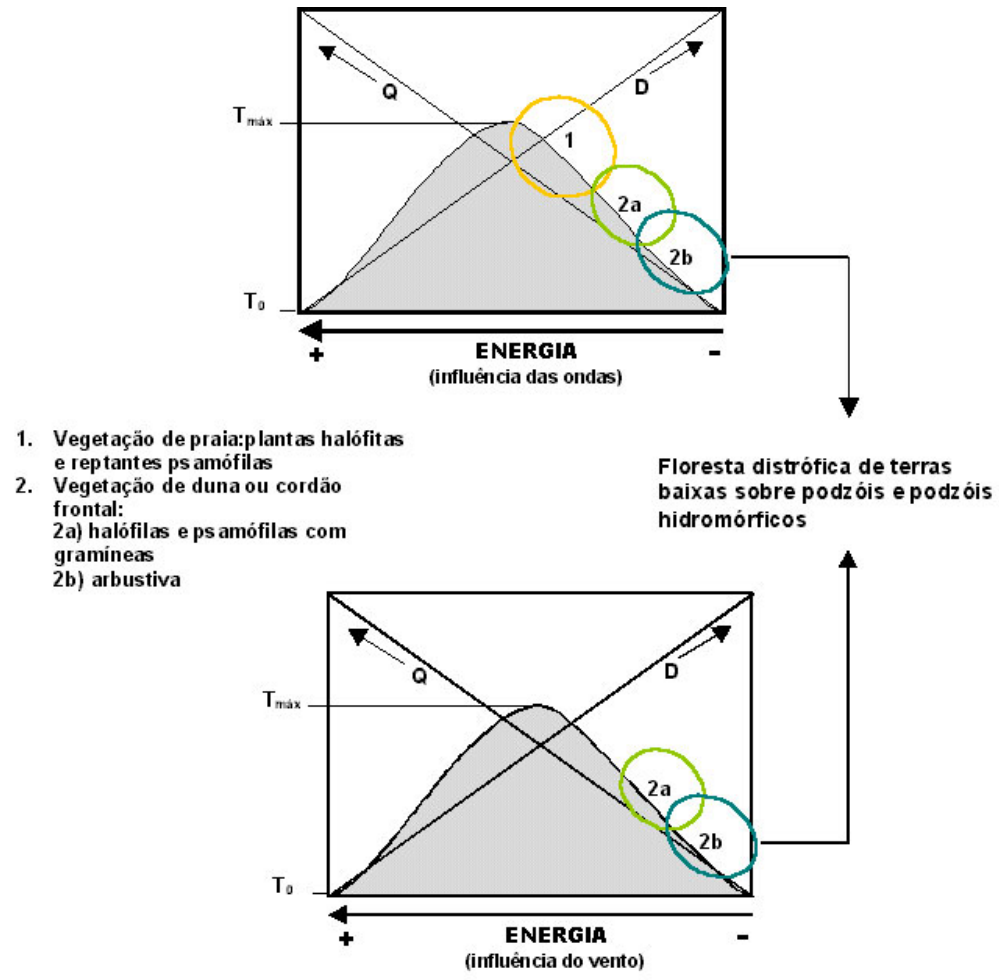
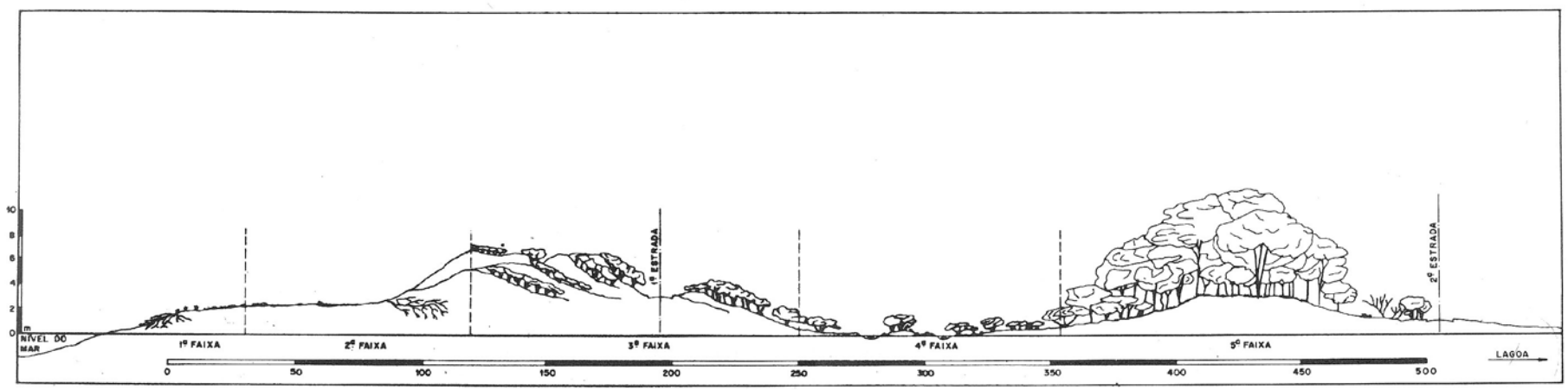


Figura 5.9. Modelo de evolução dos sistemas vegetacionais em ambientes de acumulação marinha e eólica. A expressividade da fácie de acumulação eólica depende da energia dos ventos, da disponibilidade dos sedimentos (areias finas) e do balanço hídrico.

O modelo de deposição eólica (fig. 5.9) também apresenta a vegetação de duna frontal nas duas formas (2a) e (2b) acima descritas, diferindo do modelo marinho pela ausência da vegetação de praia.

Após o final da ação morfogenética dominante, ambos os sistemas marinho e eólicos iniciam um processo de pedogênese que tipicamente conduz as areias quartzosas, os Neossolos Quartzarênicos, à formação de podzóis, os Espodossolos (BRASIL, 1983; 1987), solos que ao atingirem maior desenvolvimento sustentariam sistemas de floresta distrófica de terras baixas na maior parte da região litorânea. Em seu máximo desenvolvimento estas florestas poderiam constituir sistemas arbóreos mais diversificados em espécies, multiestratificados, com estratos herbáceo, arbustivo e arbóreos bem desenvolvidos, podendo incluir um estrato de emergentes de 25 a 30 m, correspondendo à fácie não hidromórfica da floresta de terrras baixas. Na figura 5.10 apresentamos um perfil de vegetação, na restinga da Barra de Maricá, que exemplifica estes estádios de ecossistemas marinhos e eólicos de morfogênese ativa, bem como aqueles já dominados pela pedogênese.



PERFIL DA VEGETAÇÃO NA RESTINGA DA BARRA DE MARICÁ

Figura 5.9. Perfil da vegetação na Restinga da Barra de Maricá (GARCIA DA SILVA e VIEIRA SOMNER, 1984). Nota-se que a área de morfogênese marinha ativa estende-se na área compreendida entre a baixamar e as preamares maiores (equinociais e de tormenta) que correspondem às faixas 1 e 2 do perfil. A zona de modelado eólico ativo estende-se sobretudo entre a base da duna frontal da praia (porção final da 2ª faixa) até o fim da 3ª faixa. Assim, sob um ativo processo de modelado e redisposição sedimentar, a pedogênese não avança, configurando o domínio das areias quartzosas (Neossolos Quartzarênicos). A 4ª faixa constitui um setor com sistemas de morfogênese fluvial ativa. A partir da 5ª faixa, porém, a estabilização das formas de relevo marinho e eólico permite a instalação de uma vegetação arbustiva e arbórea, que pode evoluir até floresta ombrófila distrófica, quando a evolução do perfil edáfico apresenta podzóis (Espodosssolos) bem formados no cordão mais antigo.

Como já comentado anteriormente, a expressividade espacial das fases de acumulação marinha depende da disponibilidade de sedimentos na plataforma, da amplitude da maré e do clima de ondas. Segundo a divisão de Muehe (1998), no litoral brasileiro as planícies de cristas de praia e as barras litorâneas são elementos importantes da paisagem nos macrocompartimentos da Costa dos Tabuleiros Sul (foz do rio São Francisco a Salvador-BA), onde estão desenvolvidas como planícies de cristas de praia associadas a estuários; de Ilhéus ao rio Doce, onde correspondem às fases de acumulação holocênica, em cristas de praia, na frente dos paleo-deltas dos rios Jequitinhonha, Caravela e Doce, bem como no macrocompartimento da Bacia de Campos, associados aos antigos deltas dos rios Paraíba do Sul e São João, também na forma de planícies de cristas. No macrocompartimento do Litoral dos Cordões Litorâneos da região sudeste, os ambientes de acumulação marinha e eólica aparecem na forma de barras de areia que fecham importantes lagunas costeiras; de São Vicente (SP) a Ponta do Vigia (SC), aparecem na frente de um extenso sistema estuarino, enquanto no litoral do Rio Grande do Sul, estendendo-se por cerca de 600 km de comprimento, constituem uma das faixas contínuas de praia mais extensas no mundo. Em outros compartimentos costeiros, o reduzido transporte litorâneo, a pouca extensão da plataforma, o afogamento tectônico de alguns trechos, associado a uma escassa disponibilidade de sedimentos e/ou um clima de ondas predominantemente erosivo, limita sua extensão a estreitas faixas.

Já a expressividade das formas eólicas, no entanto, responde a três variáveis importantes: a disponibilidade de areias na praia, a energia do vento e o balanço hídrico regional. Assim sendo, em zonas sob a influência de células de alta pressão e onde a precipitação é menor do que a evapotranspiração potencial, como nos compartimentos semi-áridos do litoral nordeste, a limitação hídrica proporciona um menor desenvolvimento da cobertura vegetal, a qual,

juntamente com a força da circulação atmosférica na baixa troposfera associada ao anticiclone, gera uma grande mobilidade do substrato arenoso resultando em extensas planícies de dunas. Paralelamente, no litoral de Rio Grande do Sul, embora o clima seja úmido, a elevação tectono-eustática do nível do mar (ANGULO e CAMARGO-LESSA, 1997) tem disponibilizado uma grande quantidade de areias finas, antes depositadas na plataforma, que são retrabalhadas por um sistema de ventos de alta energia (MUEHE, 1998).

Por fim, cumpre ressaltar a escala temporal subjacente à evolução dos sistemas vegetacionais de acumulação marinha e eólica desde o início da morfogênese até o pleno desenvolvimento da pedogênese. Enquanto a escala de tempo associada aos sistemas morfogenéticos ativos é da ordem de dezenas de anos, as unidades temporais necessárias para acompanhar o desenvolvimento dos sistemas sob domínio da pedogênese seriam da ordem de milhares de anos. Na verdade, a maioria dos ecossistemas de acumulação marinha e eólica englobados no conceito geral de vegetação de restinga não representa ambientes de morfogênese ativa. Para se ter uma idéia, a partir da ativação da pedogênese, ao longo do eixo temporal que vai do Holoceno atual até o Pleistoceno, são encontradas várias formações vegetacionais desde arbustivas abertas e contínuas (1 a 5 m); arbóreas uniestratificadas (5 a 10 m) até a floresta ombrófila densa de terras baixas distrófica. Ocupando os terraços marinhos pleistocênicos, esta floresta apresenta estrato herbáceo, arbustivo e pelo menos dois estratos arbóreos atingindo até 25 a 30m, configurando uma floresta bem estrururada, porém menos diversificada e desenvolvida que a floresta ombrófila de terras baixas encontrada sobre substratos terceários como o da Formação Barreiras, o que resulta da condição edáfica distrófica relacionada à matriz arenosa geradora dos solos do tipo podzol (Espodossolo).

5.6.3. A DISTRIBUIÇÃO DOS SISTEMAS VEGETACIONAIS QUATERNÁRIOS COSTEIROS: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO ENTRE O NORTE DE SANTA CATARINA E O SUL DE SÃO PAULO

5.6.3.1. Predição da distribuição dos sistemas vegetacionais alvo segundo o modelo conceitual elaborado

Cada um dos modelos anteriormente descritos representaria um curso da evolução dos sistemas vegetacionais em ambientes de deposição específicos e, posteriormente, em ambientes de pedogênese refletindo condições apresentadas pelo clima, pela saturação hídrica e pelo material parental. Não quer dizer que estes sejam os únicos, nem sequer os mais representativos, mas parecem resumir em boa medida a experiência de campo e a informação disponível na literatura.

Neste ponto cumpre destacar que a evolução das formas de relevo nas planícies litorâneas está longe de ser unidirecional. Na figura 5.11 são apresentados os estádios evolutivos propostos por Martin *et al*. (1979/80) para a planície costeira de Cananéia-Iguape (SP). Observa-se que sobre planícies de cristas de praia depositadas no Pleistoceno, fases posteriores de transgressão-regressão marinhas condicionaram a dissecção e a acumulação de novos sedimentos, formando então setores sob domínio fluvial e fluviomarinho. Deste modo, a configuração atual da planície é um complexo mosaico de unidades que refletem múltiplas formas de acumulação, idades variáveis e formações distintas.

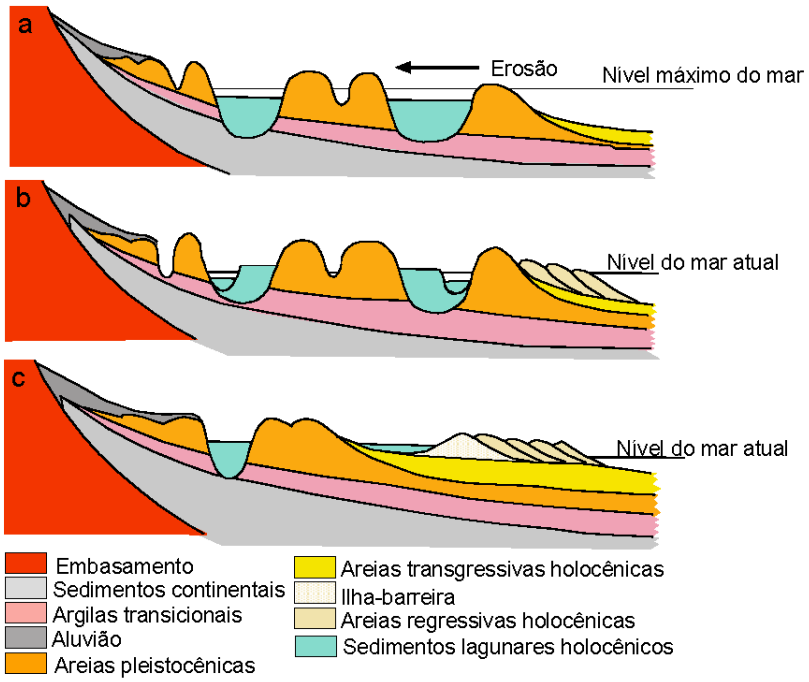


Figura 5.11. Esquema evolutivo para as planícies litorâneas da região de Cananéia-Iguape: a) sequência de areias transgressivas depositadas durante o máximo da transgressão holocênica, b) empilhamento de cordões litorâneos regressivos após o máximo, c) empilhamento de cordões litorâneos regressivos a partir de uma ilha-barreira. Fonte: Adaptado de MARTIN *et al*. 1979/80 e de SOUZA, 2005.

Ao pensar que em cada uma destas unidades ocorrem processos específicos de evolução dos sistemas vegetacionais e que estes processos apresentam diferentes graus de desenvolvimento, segundo a sua posição no eixo temporal da sucessão correspondente, obtemos uma notável heterogeneidade e variabilidade tanto na estrutura como no funcionamento destes sistemas.

Assim sendo, segundo o modelo conceitual elaborado, na configuração atual da planície ilustrada na figura 5.11, que representaria em boa medida a situação encontrada na região entre norte de SC e sul de SP, a distribuição dos sistemas vegetacionais alvo estaria estabelecida conforme descrito a seguir.

Nestas planícies apareceriam manchas de floresta distrófica e de terras baixas fácies não hidromórfica sobre os relictos dos cordões Pleistocênicos, bem como diferentes estádios na sucessão da floresta aluvial ou das formas azonais deste ambiente (se o processo morfogenético ainda estiver em curso) ocupariam a área de sedimentos fluviais. Possivelmente os manguezais bordejariam os cursos dos rios nos seus extremos influenciados pela maré e a vegetação de praia e dunas, desde a comunidade de psammófilas reptantes até a arbustiva fechada poderiam ocupar a zona de acresção marinha atual. Após esta última zona, apareceria uma seqüência de vegetação arbustiva sobre os cordões holocênicos mais jovens, passando para uma estrutura arbórea naqueles mais antigos e interiorizados. Nesta mesma seqüência, as depressões intercordões, sustentariam vegetação herbácea, arbustiva e até arbórea sob inundação, passando a floresta paludosa nos intercordões mais antigos.

Nesta concepção, a distribuição conceitual dos sistemas vegetacionais quaternários litorâneos está claramente associada ao substrato de formação dos ambientes, sendo que se esta interpretação for congruente com a situação real, esperaríamos encontrar correlação entre os temas de vegetação e geologia.

5.6.3.2. Teste das predições do modelo via cruzamento entre os mapeamentos de vegetação e de geologia-geomorfologia

Os resultados obtidos pelo cruzamento dos mapas de geologia-geormorfologia (fig. 5.2) e de vegetação, este último derivado do mapa de cobertura do solo (fig. 4.15 do Capítulo 4), forneceram um coeficiente de correlação V de Cramer de 0,71 ($p < 0,0001$), o que indica haver boa correlação entre estes dois temas.

Também as planimetrias derivadas do cruzamento dos dois mapas apontam que existe boa congruência entre as classes de vegetação e de geologia-geomorfologia, sendo que os dados apresentados na tabela 5.3 fornecem as seguintes indicações sobre a distribuição dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros:

- A maior parte das formações pioneiras de influência marinha arbustiva (BNQn) e arbóreas (ABEn, AMEn), respectivamente 35,62% , 61,15% e 42,83%, encontram-se sobre terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Holocênicos (QHpc).

- A floresta ombrófila densa (AAEn, AAEh/O) ocorre principalmente (40,06%) sobre terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Pleistocênicos (QPpc).

- Mais de 80% da área de floresta aluvial (AAC) está assentada em terraços e planícies aluviais (Qa)

- As diversas formações pioneiras de influência fluvial e/ou lacustre herbácea, arbustiva e arbóreas (HD/NF/G; ABG/NF/Cg; AMG/NF/Cg) encontram-se sobre planícies aluviais (Qa) (sobre Gleissolos, Neossolos Flúvicos e Organossolos) e sobre planícies de cordões litorâneos holocênicos (QHpc), sobretudo nas depressões intercordões (QHpe) (em Espodossolos hidromórficos e Organossolos).

- As formações pioneiras de influência fluviomarinha herbáceas (HGtB, HGtC) e arbóreas (ABGt, AMGt), os manguezais, ocorrem basicamente nas planícies de maré atuais (QAm).

Tabela 5.3. Planimetria cruzada entre as classes de vegetação e de geologia.

	CLASSES DE GEOLOGIA					
CLASSES DE VEGETAÇÃO	**QHpc (%)**	**QHp e (%)**	**QPpc (%)**	**QAm (%)**	**Qa (%)**	**Ql (%)**
BNQn	35.62	18.85	25.1	6.18	14.08	0.17
ABEn	61.15	14.60	13.01	9.04	2.14	0.06
AMEn	42.83	18.99	18.34	14.59	4.90	0.35
AAEn	29.68	27.86	40.06	2.16	0.19	0.05
HO/NF/G	37.51	17.96	11.40	17.86	14.81	0.46
ABO	9.02	36.11	19.73	14.29	20.23	0.62
AMEh/O	27.65	37.43	24.29	3.31	6.55	0.77
AAEh/O	21.62	25.21	36.23	0.43	15.16	1.35
BO/NF/G	9.84	41.26	16.30	1.20	29.76	1.64
ABG/NF/Cg	2.07	47.99	22.11	0.76	22.71	4.36
AMG/NF/Cg	18.36	35.47	35.66	1.46	8.04	1.01
AAC	0.00	0.37	0.56	0.14	83.22	15.71
HGtB	6.39	8.17	6.25	73.23	5.32	0.64
HGtC	32.35	7.48	1.33	52.54	5.46	0.84
ABGt	5.95	2.69	1.95	89.34	0.07	0
AMGt	2.67	4.64	2.77	88.22	1.56	0.14

Legenda das classes de geologia: (**Qa**) Terraços e planícies aluviais *(Quaternário indiferenciado)*. (**QAm**) Planícies de maré atuais. (**QHpc**) Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Holocênicos. (**QHpe**) Planícies paleoestuarinas. (**QPpc**) Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Pleistocênicos. (**Ql**) Leques, tálus e colúvios *(Quaternário indiferenciado)*.
Legenda das classes de vegetação: (**AAEn**) Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Média secundária intermediária; Formação Arbórea Baixa secundária intermediária)*. (**AAEh/O**) Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo. (**AMG/NF/Cg**) Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleicos *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*. (**AMEh/O**) Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico)*. (**ABGt**) Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo tiomórfico. (**ABG/NF/Cg**) Formação Arbórea Baixa sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*. (**BNQn**) Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Neossolo Quartzarênico hidromórfico; Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico não-hidromórfico e Formação Herbácea sobre Neossolo Quartzarênico hidromórficos)*. (**HO/NF/G**) Formação Herbácea sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo. (**HGtB**) Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – brejo de maré *(legenda mista com presença de Formação Arbustiva sobre Gleissolo tiomórfico)*. (**HGtC**) Formação Herbácea sobre Gleissolo tiomórfico – zona de *Cladium (legenda mista com presença de Solo Exposto)*. (**ABO**) Formação Arbórea Baixa sobre Organossolo. (**ABEn**) Formação Arbórea Baixa sobre Espodossolo não-hidromórfico. (**AMGt**) Formação Arbórea Média sobre Gleissolo tiomórfico. (**AMEn**) Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo)*. (**BO/NF/G**) Formação Arbustiva sobre Organossolo, Neossolo Flúvico ou Gleissolo. (**AAC**) Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo.

5.6.3.3. Teste das predições do modelo via comparação com levantamentos botânicos

O Parque Nacional do Superagüi, do qual faz parte a ilha homônima, é detentor de uma ampla variedade de tipos de vegetação, sendo uma das poucas unidades de conservação no país a comportar parcela significativa de sistemas vegetacionais quaternários arbóreos.

A tabela 5.4 fornece uma comparação entre o arcabouço geológico e os resultados de Jaster (1995) sobre a distribuição dos sistemas vegetacionais quaternários, obtidos em campo ao longo de um transecto que atravessa a porção sul da Ilha de Superagüi de margem a margem (fig. 5.12).

Tabela 5.4. Arcabouço geológico e distribuição das formações vegetacionais obtidas em campo por Jaster (1995) na Ilha de Superagüi (litoral norte do Paraná).

FORMAÇÃO	***OCORRÊNCIA***	***UNIDADE GEOLÓGICA***
Formações Pioneiras de Influência Marinha *(vegetação de praia e arbustiva de dunas*)	Até 200m da praia	(QAp) Praias (QAd) Dunas Frontais
Formações Pioneiras de Influência Marinha (*vegetação arbórea de restinga*)	Porções mais recentes das planícies de restinga, até 2300m da praia, em terrenos mais secos no topo dos cordões	(QHpc) Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Holocênicos
Formações Pioneiras de Influência Fluvial *(brejos herbáceo-arbustivos e "caxetais" com Tabebuia cassinoides)*	Porções mais recentes das planícies de restinga, até 2300m da praia, em ambientes úmidos ou inundados dos intercordões, ou próximos aos rios	(QAb) Brejos intercordões (QHpc) Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Holocênicos
Formações Pioneiras de Influência Fluviomarinha, *(marismas e manguezais)*	Áreas marginais do interior das baías influenciadas pela maré	(QAm) Planícies de maré (QAmr) Marismas e bancos (QAmm) Manguezais
Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas	Porções mais interiorizadas das planícies de restinga, de 2300 a 3750m da praia, até a base do morro do Superagüi	(QPpc) Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Pleistocênicos

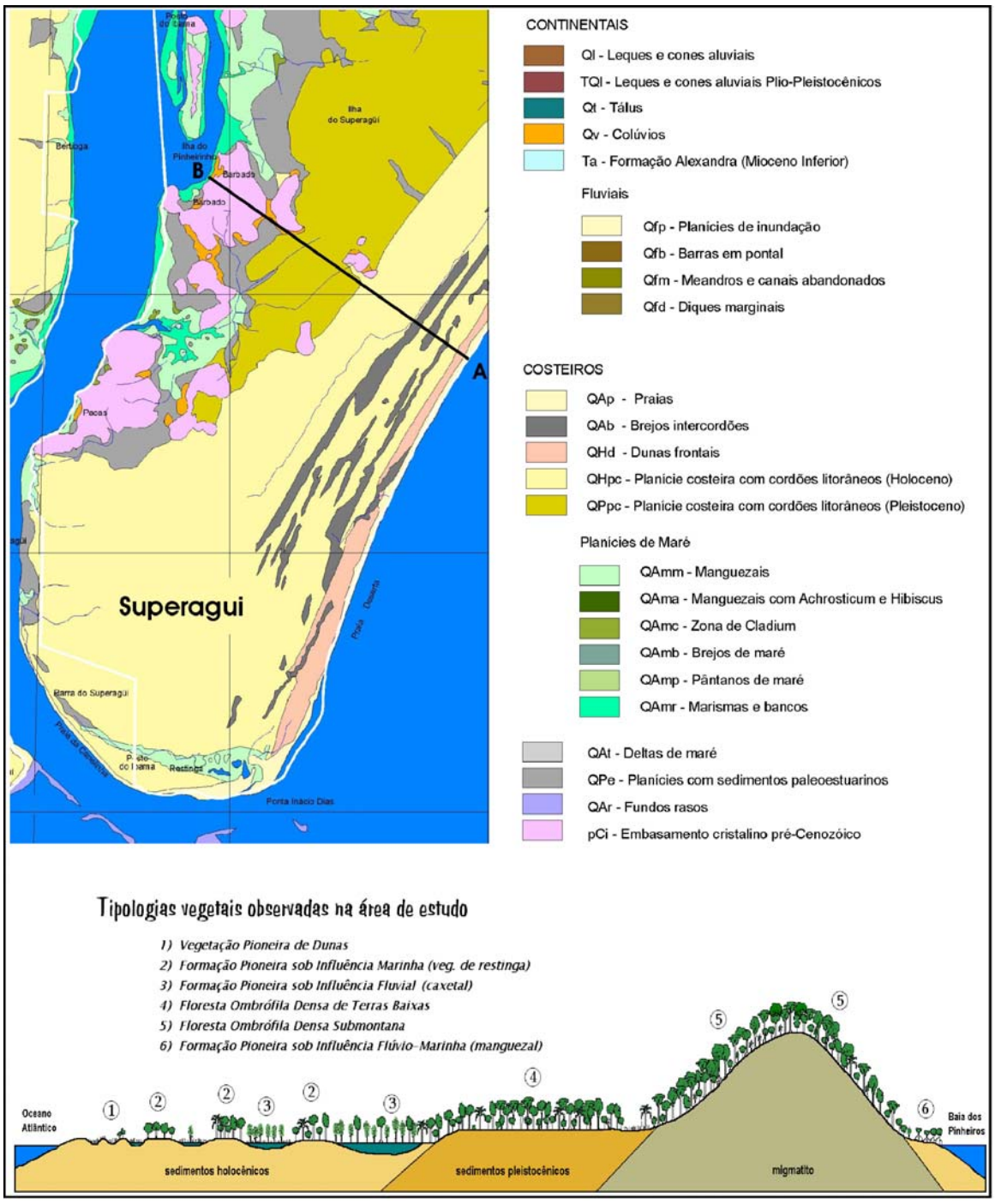


Figura 5.12. Mapeamento geológico e formações vegetacionais em um perfil da porção sul da Ilha de Superagüi. (A-B) Transecto dos levantamentos botânicos de campo. Fonte: Adaptado de Angulo (1992) e Jaster (1995).

Como pode ser observado na tabela 5.3, a distribuição das Formações Pioneiras de estrutura herbácea e arbustiva coincide com os terrenos atuais e holocênicos mais recentes, sendo que os sistemas marinhos, fluviais e fluviomarinhos correspondem, respectivamente, a substratos de planícies marinhas, de depressões no interior destas e de planícies de maré. Já os sistemas florestais mais desenvolvidos correspondem aos terraços mais antigos do Holoceno e Plesitoceno.

5.6.3.5. Avaliação das predições do modelo

Tanto os resultados obtidos através do cruzamento entre os mapeamentos de vegetação e geologia-geomorfologia como da comparação entre o arcabouço geológico e os levantamentos botânicos demonstraram que existe boa correspondência entre a distribuição dos sistemas vegetacionais e a dos substratos geológico-geomorfológicos. Do mesmo modo, este conjunto de resultados está em concordância com as previsões derivadas do modelo conceitual de gênese dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros, que foram descritas no final do item 5.6.3.1.

Obviamente os modelos precisam de uma elaboração mais profunda, já que os tipos de sedimentos depositados pelos rios e pelo mar são de granulometria e natureza mineralógica diversa. Deve-se ainda considerar que existe a influência do substrato geológico das bacias dos rios e de sua competência, além de uma ampla gama de condições de sedimentação (*e.g.* em diferentes posições topográficas da planície de inundação ou do delta). Conseqüentemente, a variabilidade das formas de depósito de um mesmo tipo de processo pode ser muito ampla no litoral brasileiro. Contudo, consideramos que este tipo de modelos permite uma interpretação mais adequada da complexidade destes ambientes em comparação com aqueles onde a morfogênese é utilizada apenas como um marco geral e pouco informativo dos processos que ali se expressam a nível de sistema vegetacional.

5.6.4. ESBOÇO DA EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA DOS SISTEMAS QUATERNÁRIOS COSTEIROS

Esta segunda e última parte dos resultados trata do tema da evolução paleoambiental dos sistemas quaternários costeiros, analisada em dois setores da região de estudo: a península de Superagüi (atualmente uma ilha artificial do litoral norte do Paraná) e a planície de Itapoá (litoral norte de Santa Catarina).

Com o intuito de facilitar a comparação dos estádios evolutivos das duas reconstruções paleogeográficas com os modelos evolutivos da literatura, inicialmente relaciona-se os modelos de evolução paleogeográfica já elaborados para os ambientes costeiros que englobam a região sul-sudeste, para então apresentar os dois esboços de evolução paleogeográfica para os setores analisados.

5.6.4.1. Modelos de evolução paleogeográfica para ambientes da costa sul e sudeste do Brasil

Suguio *et al.* (1985) forneceram uma síntese do modelo evolutivo da costa brasileira entre Alagoas e Santa Catarina. Para o litoral sul, Villwock *et al.* (1986) elaboraram um modelo para a planície costeira do Rio Grande do Sul e Suguio *et al.* (1986) para os estados do Paraná e de Santa Catarina. Em 1987 uma nova síntese do modelo evolutivo das planícies litorâneas quaternárias do sudeste e sul do Brasil foi produzida por Suguio e Martin, que seria uma combinação com pequenas adaptações dos modelos evolutivos proposto por Martin *et al.* (1983) e Suguio *et al.* (1985) para o trecho entre Macaé (RJ) e Recife (PE) e daquele provido por Villwock *et al.* (1986) para o Rio Grande do Sul (SOUZA, 1999). Este novo modelo apresenta sete estágios evolutivos para a planície costeira sul e sudeste do Brasil (fig. 5.13):

Estádio I: máximo da regressão pliocênica, onde o nível do mar estaria no mínimo a 100 m abaixo do atual.

Estádio II: transgressão e regressão do Pleistoceno inferior (?), encontrado apenas no Rio Grande do Sul denominado de Barreira I ou Lombas.

Estádio III: transgressão e regressão do Pleistoceno Médio, responsável pela formação da ilha-barreira que separa o sistema lagunar Patos-Mirim do Oceano no Rio Grande do Sul. Nas planícies costeiras do Paraná e de Santa Catarina este estágio pode ser relacionado aos terraços arenosos e de cascalhos marinhos que se localizam cerca de 13 m acima do nível atual.

Estádio IV: transgressão e regressão do Pleistoceno Superior, quando o mar estaria cerca de 8 ± 2 m acima do atual. Este estádio está representando por terraços arenosos com altitudes em torno de 13 m. Segundo datações de corais na Bahia e de areias no Rio Grande do Sul, estes terraços apresentariam uma idade média de cerca de 120.000 anos A.P.

Estádio V: máximo da transgressão holocênica, quando a subida do nível do mar afogou os baixos cursos de rios transformando-os em estuários, que foram isolados por ilhas-barreira e em algumas regiões formaram grandes lagunas.

Estádio VI: construção de deltas intralagunares nas lagunas formadas nas desembocaduras dos principais rios.

Estádio VII: construção dos terraços marinhos holocênicos a partir de ilhas-barreira, durante a descida do nível marinho.

Na década de 90, Angulo (1992) e Lessa *et al.* (1999) propuseram um modelo de evolução para a planície costeira de Paranaguá, segundo o qual a formação da planície costeira teria sido a partir de ilhas-barreira transgressivas e regressivas tanto no Pleistoceno como no Holoceno. Baseados nas alturas da barreira pleistocênica e das fácies de mar aberto das barreiras pleistocênica e holocênica, Lessa *et al.* (1999) sugerem que o nível máximo do mar no Holoceno tenha sido maior que o nível do mar associado com a última fase de progradação da barreira pleistocênica. Segundo estes autores a progradação da metade da barreira atual ocorreu nos últimos mil anos, com um nível do mar de 0,5 m acima do atual, e o desenvolvimento da barreira holocênica ocorreu tanto no sentido transversal quanto longitudinal à costa, tendo como fonte de sedimentos a erosão de outras barreiras ao sul da área (SOUZA, 1999).

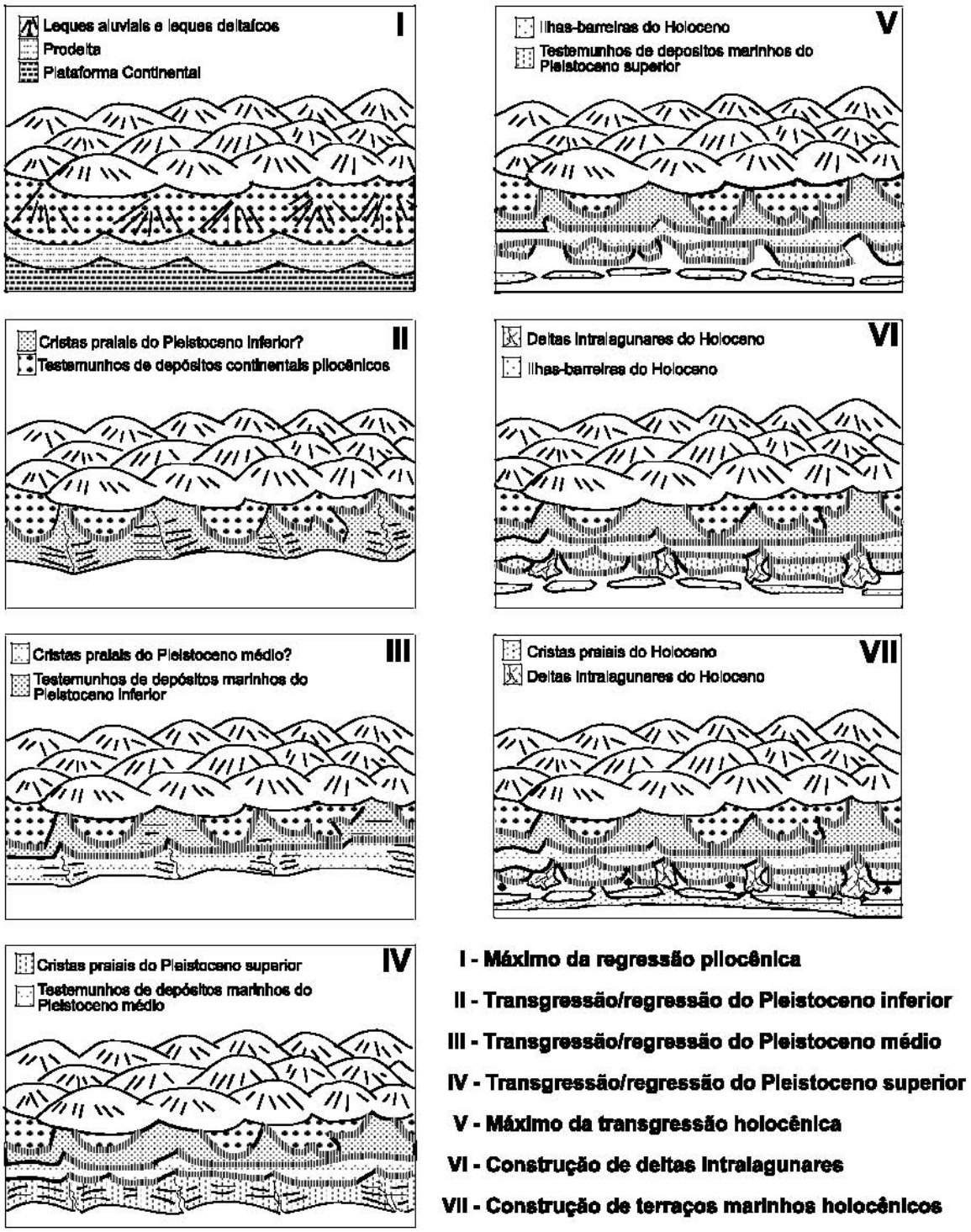


Figura 5.13. Evolução geológica das planícies litorâneas do sudeste e sul do Brasil durante o Quaternário. Fonte: Suguio e Martin (1987).

Já para o litoral norte de Santa Catarina, Horn Filho (1997) apresentou um modelo evolutivo com sete estágios: (1) máximo da transgressão do Plioceno, quando o mar estaria acima do atual; (2) máximo da regressão do Plioceno, que seria equivalente ao Estágio I de Suguio e Martin (1987); (3) transgressões e regressões do Pleistoceno Inferior e Médio, que corresponderia aos Estágios II e III de Suguio e Martin (1987); (4) máximo da transgressão do Pleistoceno Superior, equivalente a parte transgressiva do Estágio IV de Suguio e Martin (1987); (5) máximo da regressão do Pleistoceno Superior, equivalente a parte regressiva do Estágio IV de Suguio & Martin (1987); (6) máximo da transgressão do Holoceno, equivalente ao Estágio V de Suguio e Martin (1987) e (7) máximo da regressão no Holoceno, equivalente ao Estágio VII de Suguio e Martin (1987).

5.6.4.2. Setor 1: Península de Superagüi

O esboço de evolução paleogeográfica apresentado a seguir procura descrever as principais etapas de construção e transformação dos ambientes na península de Superagüi, que ocorreram a partir do Pleistoceno superior.

Primeiro estádio

Durante o máximo da transgressão Cananéia (120.000 anos A.P.), associada ao estágio interglacial Riss-Würm, o mar deve ter atingido o sopé da Serra do Mar, alcançando uma altura de oito metros sobre o nível atual, de modo que a costa mostrava configuração típica de costa de imersão. Corresponderia à fase transgressiva do Estádio IV de Suguio e Martin (1987).

Segundo estádio

Com o advento da fase regressiva, os processos de dinâmica costeira construíram sucessivos cordões arenosos litorâneos, que acabaram por formar uma planície arenosa suavemente ondulada, a planície de restingas. Representaria a fase regressiva do Estádio IV de Suguio e Martin (1987).

Terceiro estádio

Ao longo desta fase o nível marinho esteve sempre inferior ao atual, chegando a atingir mais de 110 m abaixo deste nível há cerca de 18.000 anos A.P.. Dessa forma, a nova planície, submetida aos agentes de dinâmica subaéreas, começou a ser retrabalhada sobretudo por ação fluvial, quando a drenagem deve ter erodido profundamente a planície de restinga. Neste estádio praticamente completa-se a construção do terraço marinho pleistocênico, o que representaria o final da fase regressiva do Estádio IV de Suguio e Martin (1987).

Quarto estádio

No início do último evento trangressivo, correspondente ao último pós-glacial, o nível do mar subiu rapidamente, tendo ultrapassado o nível atual, entre 6.000 e 7.000 anos A.P., cerca de quatro metros. Em conseqüência, o mar invadiu as áreas rebaixadas pela erosão, formando um extenso sistema lagunar, onde sedimentos areno-argilosos enriquecidos de material orgânico foram depositados, fato que deve ter ocorrido há aproximadamente 5.100 anos A.P. A configuração do Superagüi nesta fase exibia maior extensão de baías e estuários e o litoral de mar aberto situava-se entre dois e quatro quilômetros para o interior em relação à costa atual. As paleolagunas e paleoestuários aqui gerados por afogamento e posteriormente colmatados por

acumulação fluviomarinha marcam a origem dos sedimentos paleoestuarinos. Concomitantemente, o mar deve ter erodido também as partes mais altas dos sedimentos marinhos pleistocênicos, redepositando areias para formar depósitos marinhos holocênicos de natureza também arenosa. Corresponderia ao Estádio V de Suguio e Martin (1987).

Quinto estádio

Enquanto o mar retornava para o nível marinho atual, cristas praiais regressivas holocênicas foram formadas. Durante a porção final da última regressão, flutuações do nível marinho produziram várias gerações de cordões litorâneos. Formam-se neste estádio os feixes de restingas subatuais I e II, bem como as planícies de maré atuais e de modo incipiente os feixes de restingas atuais. Este período estaria correlacionado ao Estádio VII de Suguio e Martin (1987).

Sexto estádio

Representa o período mais recente, desde a segunda metade do século XX. A sua inclusão como fase discriminada no modelo evolutivo pareceu conveniente em função do recobrimento aerofotogramétrico e da ocorrência de eventos relevantes naturais e antrópicos. Dentre os naturais destacam-se a formação de grande parte dos feixes de restingas atuais e das praias atuais. Por fim, ressalta-se a grande alteração antrópica sobre a configuração da costa do Superagüi, que através da abertura do Canal do Varadouro em 1952/53 transformou a antiga península em ilha artificial.

5.6.4.3. Setor 2: Planície de Itapoá

Baseada nos modelos de evolução de Angulo (1992) e Lessa *et al.* (1999) para a região costeira do Estado do Paraná, Souza (1999) apresentou uma reconstrução das fases evolutivas de construção dos terrenos da região costeira de Itapoá.

Em termos paleoambientais, o trabalho de Behling e Negrelle (2001) constitui uma das raras referências em termos de reconstrução palinológica disponível para a região do quaternário costeiro do leste do Brasil e a única disponível contemplando ambientes florestais.

Tomando como base estas duas reconstruções apresenta-se a seguir um esboço de evolução paleoambiental para a planície de Itapoá.

Primeiro estádio

No Terciário (Mioceno Inferior?), quando o nível do mar estava provavelmente abaixo do atual, houve a formação de leques aluviais (Formação Mina Velha) nos contrafortes da Serra do Mar e morros associados. Esta fase poderia ser associada aos Estádios I de Suguio e Martin (1987) e 2 de Horn Filho (1997), onde são incluídas as formações Barreiras no Rio de Janeiro, Pariqüera-açu em São Paulo, Alexandra no Paraná, Iquererim, Canhanduva e Cachoeira em Santa Catarina, e Graxaim no Rio Grande do Sul. Porém, cabe lembrar que estas formações segundo Lima e Angulo (1990), Melo (1990) e Angulo (1995), abrangem idades desde o Mioceno Inferior até o Pleistoceno, sendo que a Formação Mina Velha foi tentativamente correlacionada à Formação Alexandra do Mioceno Inferior (SOUZA, 1999).

Não há informação palinológica para esta fase.

Segundo estádio

No Pleistoceno superior, provavelmente a 120.000 anos A.P., o mar atingiu o máximo de 8 ± 2 m acima do nível atual (MARTIN *et al.* 1988). Os depósitos paleoestuarinos existentes entre a parte mais interna dos terraços pleistocênicos e os depósitos continentais sugerem a existência de uma ilha-barreira na centro norte da planície, com uma laguna à retaguarda (figura 5.14). Na porção mais ao sul, na área da Baía de São Francisco do Sul, os terraços pleistocênicos estão em contato com o sopé da serra, não existindo evidências de sedimentos lagunares em superfície (fig. 5.14). Este estádio corresponderia à parte transgressiva do Estádio IV de Suguio e Martin (1987) e ao Estádio 4 de Horn Filho (1997).

Não há informação palinológica para este estádio.

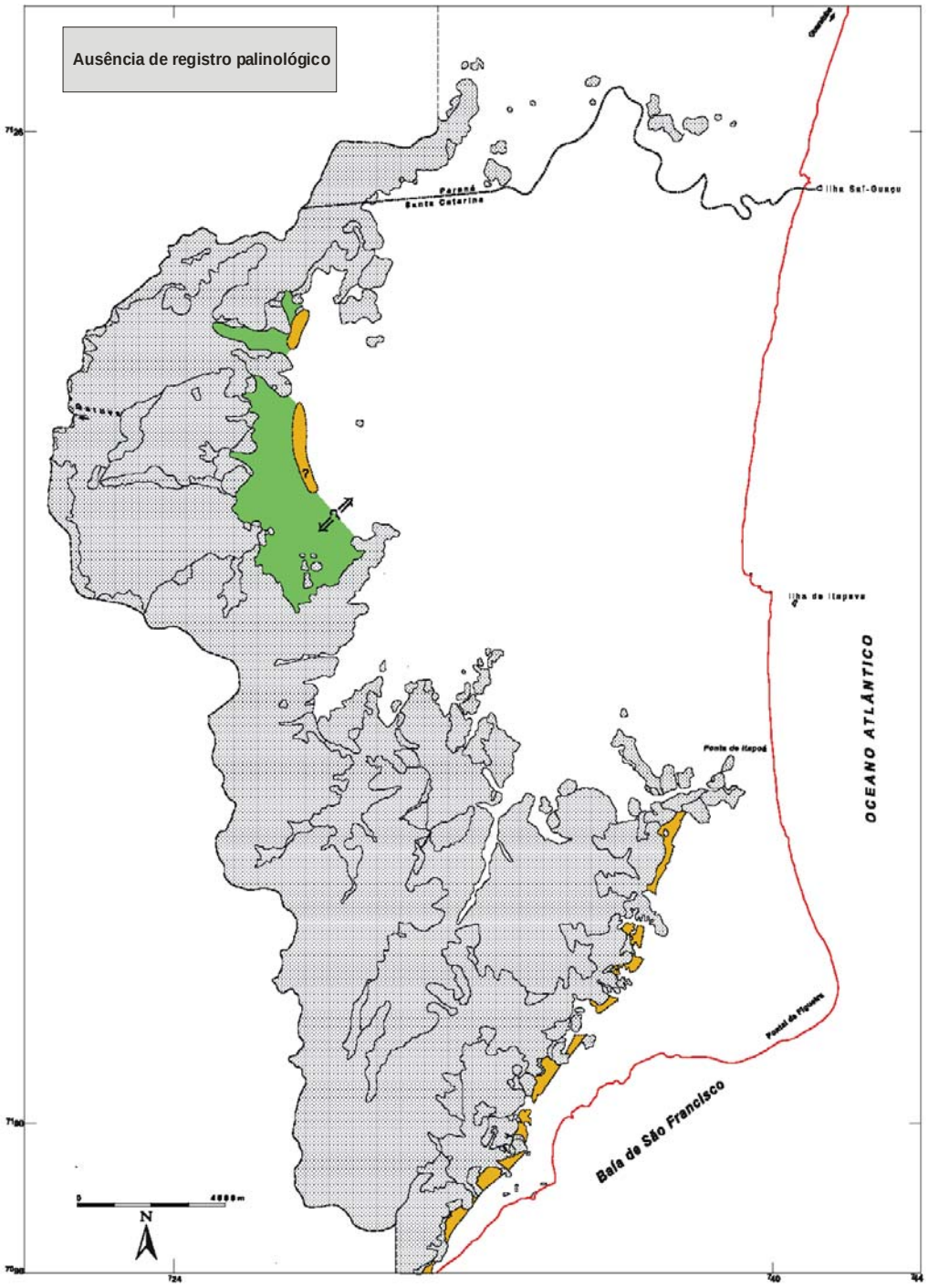


Figura 5.14. Configuração paleogeográfica da planície costeira de Itapoá durante o máximo da transgressão pleistocênica. Em cinza hachurado - rochas do embasamento e depósitos continentais indiferenciados; em laranja - barreiras transgressivas, em verde – lagunas. A linha vermelha representa a linha de costa atual. Fonte: Adaptado de Souza (1999).

Terceiro estádio

Após o máximo transgressivo, iniciou-se a formação de extensas planícies de cordões litorâneos regressivos, que preencheram a ampla baía que existia ao norte de Itapoá (fig. 5.15). Estes terraços estendiam-se, provavelmente, muito mais a leste da atual área de afloramento. Durante o período de mar baixo, entre a penúltima e última transgressão, estes terraços foram dissecados por um sistema fluvial de padrão retangular cujos cursos acompanhavam as depressões intercordões ou os cortavam perpendicularmente. Este estádio corresponderia à parte regressiva do Estádio IV de Suguio e Martin (1987) e ao Estádio 5 de Horn Filho (1997).

Neste estádio inicia a informação palinológica fornecida por Behling e Negrelle (2001), que corresponde a um registro ("core") coletado em uma depressão intercordão colmatada, situada na localidade de Volta Velha, na planície de Itapoá (SC).

Como pode ser observado na figura 5.16, as assembléias de pólen do período anterior ao Último Máximo Glacial ("Last Glacial Maximum - LGM"), entre 37.500 e 27.5000 A.P., nomeadas Zona VV-I, bem como a do próprio LGM (entre 27.500 e 14.500 A.P, Zona VV-II), ambas indicam uma vegetação dominada por espécies herbáceas das famílias Poaceae e Asteraceae, sendo ainda relativamente comuns *Eriocaulon/ Paepalanthus, Eryngium, Xyris e Moritzia dasiantha*. Estes dados sugerem que uma vegetação campestre, talvez similar à encontrada atualmente nas zonas alto-montanas.

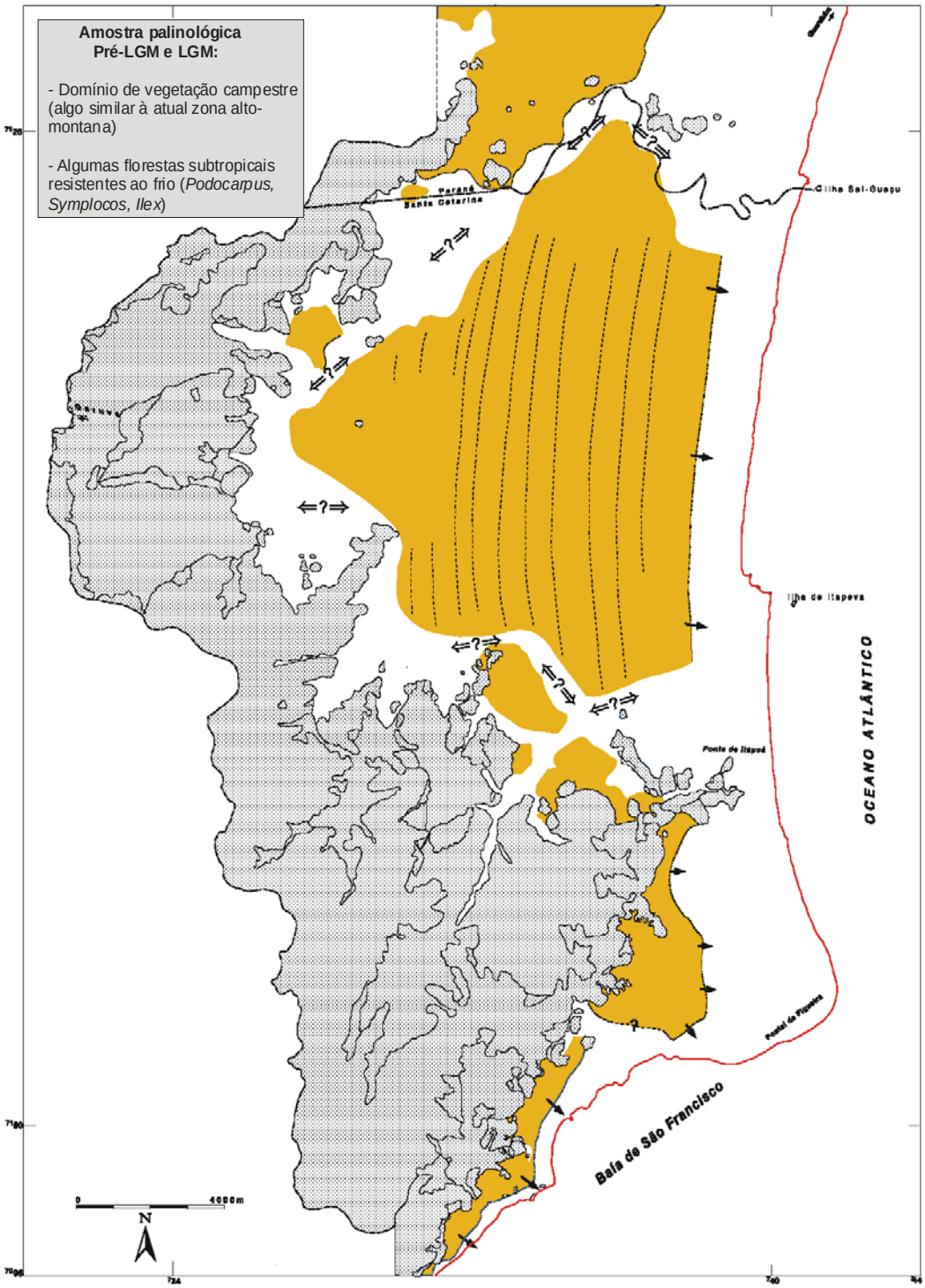


Figura 5.15. Configuração paleogeográfica da planície costeira de Itapoá durante o período regressivo após o máximo da transgressão pleistocênica. Em cinza hachurado - rochas do embasamento e depósitos continentias indiferenciados; em laranja - barreiras transgressivas. A linha vermelha representa a linha de costa atual. Pré-LGM *(Pre Last Glacial Maximum)*, de 37.500 a 27.500 A.P.; LGM, de 27.500 a 14.500 A.P. Fonte: Adaptado de Souza (1999).

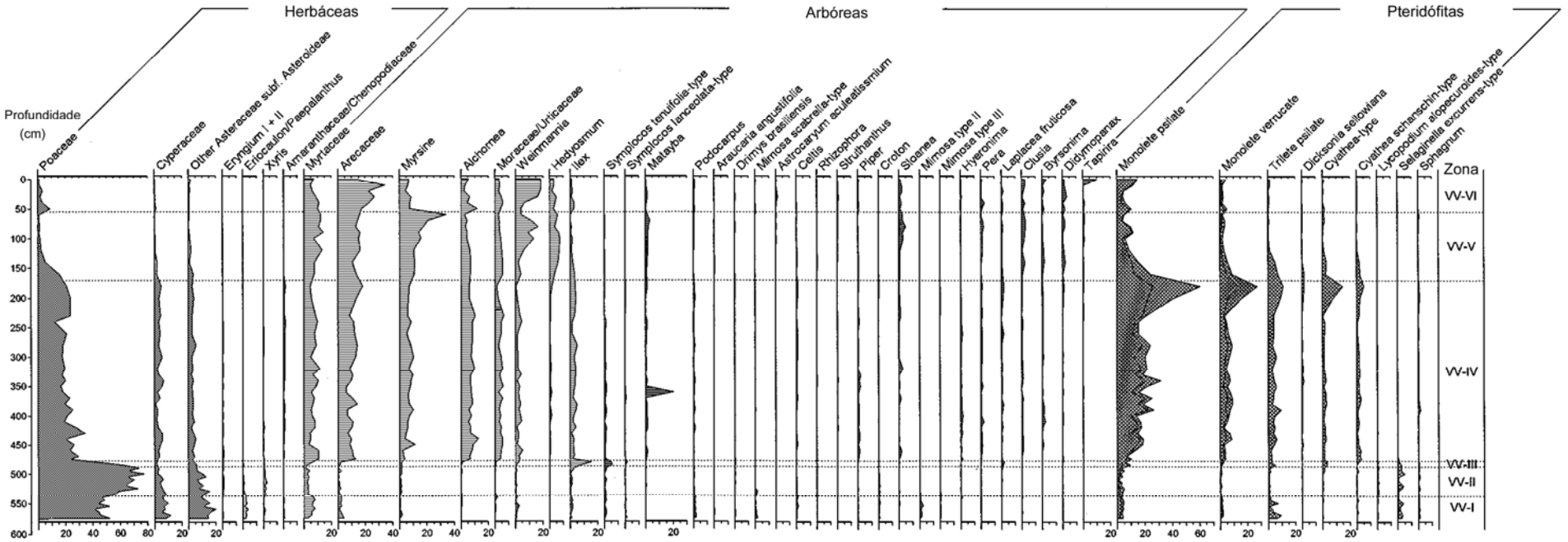


Figura 5.16. Diagrama das porcentagens de pólens dos principais táxons encontrados no registro de Volta Velha, planície de Itapoá, litoral norte de Santa Catarina. Fonte: Adaptado de Behling e Negrelle (2001).

A ocorrência relativamente freqüente de Myrtaceae e de Melastomataceae, além de algumas espécies arbóreas tais como *Podocarpus*, *Symplocos* e *Ilex* sugerem que durante os períodos pré-LGM e o LGM existiram nas planícies costeiras algumas florestas subtropicais adaptadas ao frio, mas não houve ocorrência de *Araucaria angustifolia*. Contudo, a alta porcentagem de herbáceas indica que estas florestas deveriam ocupar pequenas áreas. Grãos de pólen de *Mimosa* II e I II ocorreram apenas durante os períodos glaciais. *Symplocos tenuifolia* e depois *Ilex* atingiram porcentagens máximas no final do registro glacial (Zona VV-III), sendo que esta mudança ocorreu um pouco antes da maioria dos táxons tropicais aumentarem em porcentagem, o que indicaria um passo em direção a um clima mais quente, sugerindo a ocorrência de um estádio sucessional anterior à subseqüente expansão e desenvolvimento da floresta ombrófila tropical no Holoceno.

A composição da vegetação foi relativamente constante a partir do Holoceno inferior (Zona VV-IV) até cerca de 6.700 A.P. As pteridófitas, inclusive algumas arbóreas, tornaram-se freqüentes na floresta, sugerindo um clima mais úmido do que anteriormente. Uma porcentagem relativamente alta de pólen de herbáceas indica que não houve uma cobertura completa de florestas no Holoceno inferior.

Quarto estádio

Ao longo da transgressão holocênica o mar já tinha atingido nível superior ao atual em 6.480 ± 90 anos A.P., sendo que há 5.510 ± 70 A.P. o mar já havia superado o nível atual por mais de 1,5m. O máximo da transgressão teria ocorrido em 5.100 anos A.P. (Suguio *et al., 1*986) ou entre 5.000 e 5.400 anos A.P. (Angulo e Souza, 1999). A cerca de 4.200 ± 70 anos A.P., ou seja, há aproximadamente 1000 anos após o máximo transgressivo, existem indicadores de um

paleonível de 2,49 ± 1,0m acima do nível atual. Assim sendo, o máximo da transgressão holocênica na região teria sido superior a esta altitude.

Durante o máximo da transgressão existiam provavelmente esporões ou ilhas-barreiras ao norte e ao sul de Itapoá. Conforme Lessa *et al.* (1999) esta configuração sugere a existência de ilhas-barreira durante a transgressão holocênica. Neste estádio de máximo da transgressão os estuários e lagunas teriam alcançado sua maior extensão (fig. 5.17). Este estádio corresponderia ao Estágio V de Suguio & Martin (1987) e ao Estágio 6 de Horn Filho (1997).

Os registros polínicos e paleontológicos também corroboram os eventos trangressivos. Segundo as análises de pólen, a vegetação herbácea na Zona VV-IV ocorreu nas proximidades de planícies alagadas, como um resultado de possíveis incursões marinhas. Foraminíferos marinhos também são encontrados nestes sedimentos, representando forte indicação de incursões marinhas. Não obstante, a presença de poucos grãos de pólen de *Rhizophora* indica que os manguezais estavam muito pouco desenvolvidos.

Quinto estádio

Após o máximo transgressivo, iniciou-se a formação de cordões litorâneos regressivos, sobretudo ao sul da Ilha de Itapeva (fig. 5.18). Ao norte da Ponta de Itapoá existiam esporões que migravam para norte, deslocando as desembocaduras na mesma direção. O Rio Saí-Mirim teve, ao longo deste período, sua desembocadura progressivamente deslocada para o norte, até atingir sua posição atual. Enquanto isto, o meandramento do rio erodia a retaguarda dos cordões holocênicos. Neste processo provavelmente também ocorreu erosão dos esporões e das ilhas-barreira transgressivas. Este estádio corresponderia ao Estádio VII de Suguio e Martin (1987) e ao Estádio 7 de Horn Filho (1997).

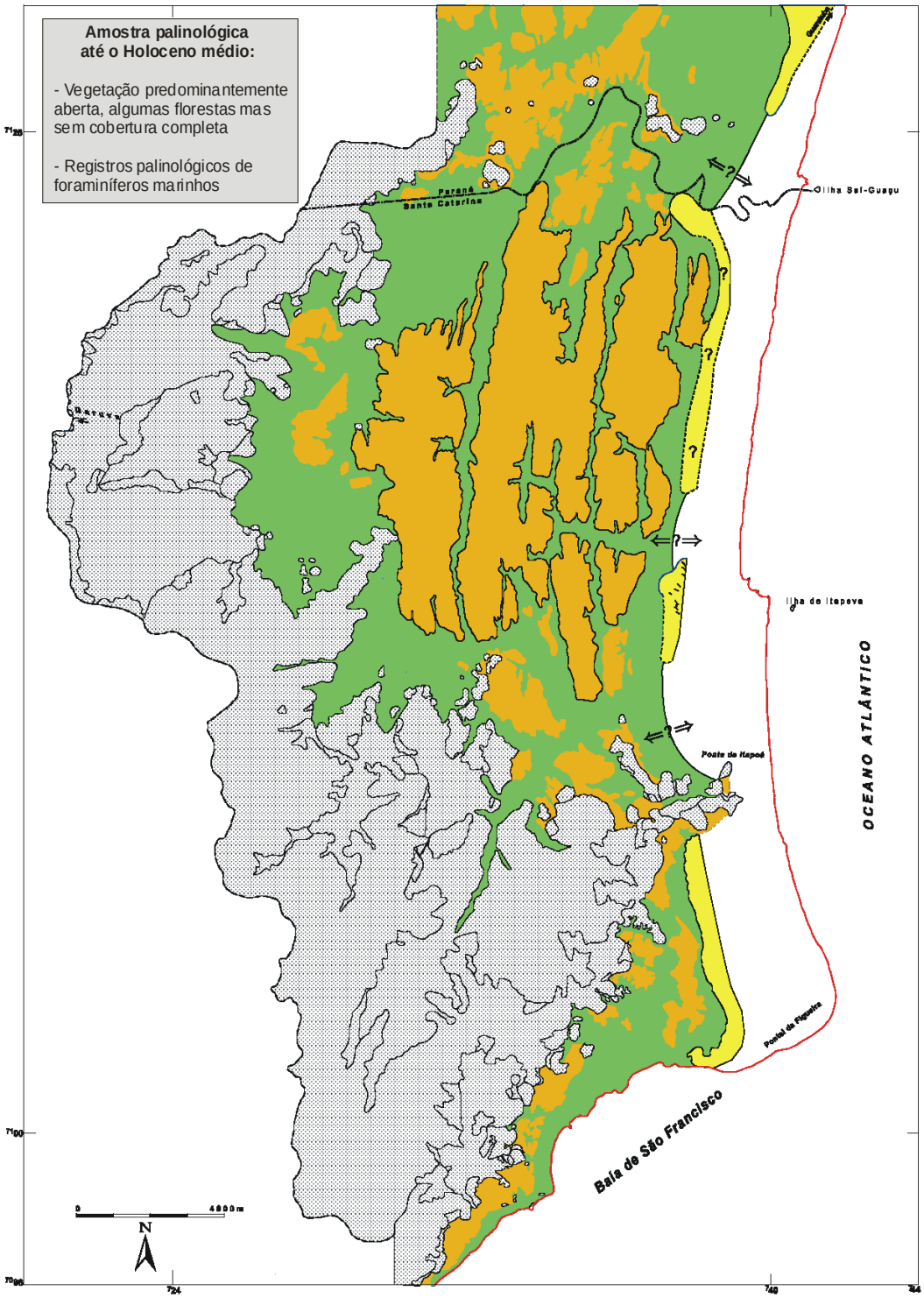


Figura 5.17. Configuração paleogeográfica da planície costeira de Itapoá durante o máximo da transgressão holocênica. Em cinza hachurado - rochas do embasamento e depósitos continentias indiferenciados; em laranja - terraços pleistocênicos; em verde - estuários e lagunas; em amarelo - barreira transgressiva e esporões holocênicos. A linha vermelha representa a linha de costa atual. Fonte: Adaptado de Souza (1999).

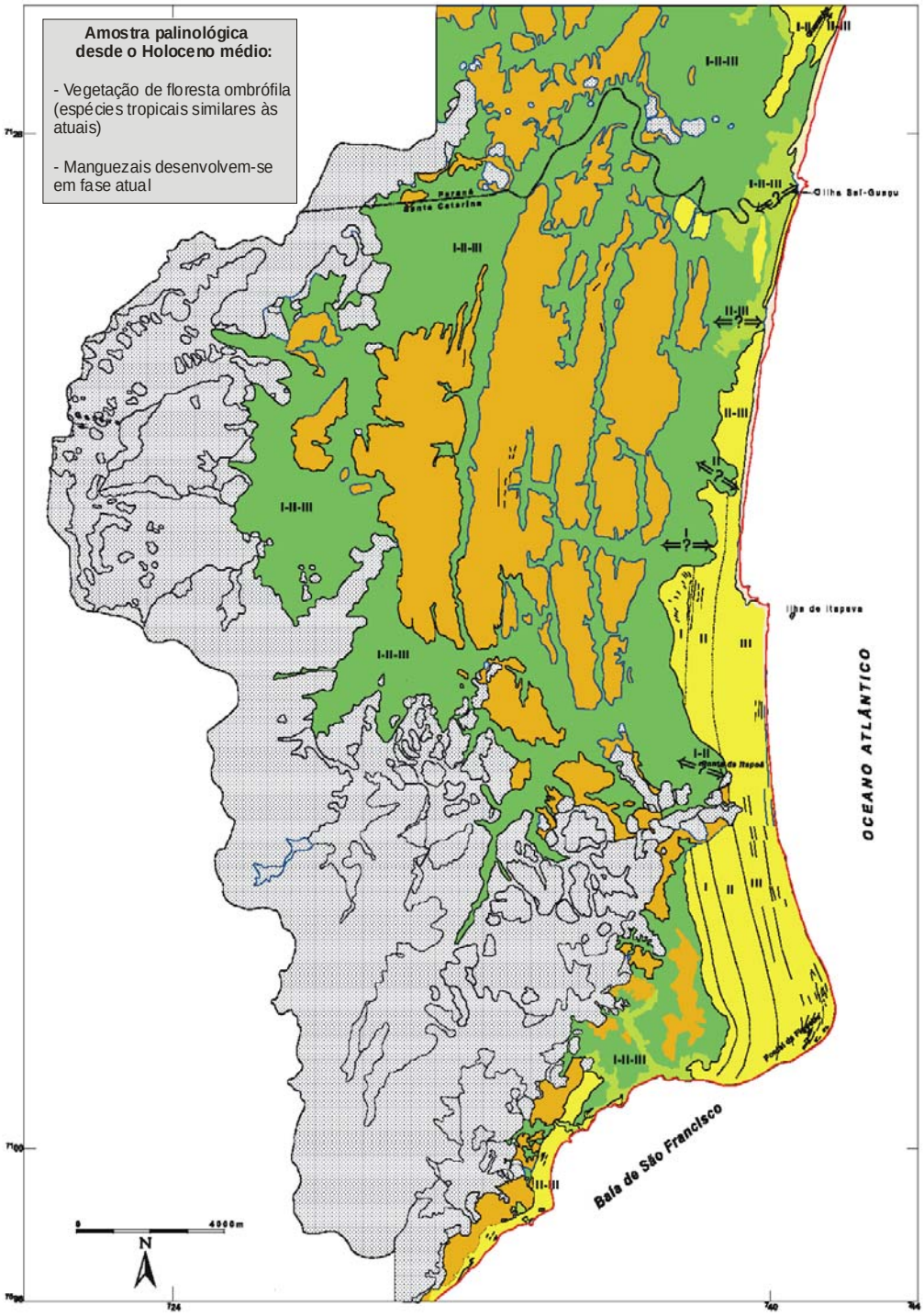


Figura 5.18. Configuração atual da planície costeira de Itapoá após o máximo da transgressão holocênica. Em cinza hachurado - rochas do embasamento e depósitos continentias indiferenciados; em laranja - terraços pleistocênicos; em verde escuro - paleolaguna; em verde claro - planícies de maré atuais; em amarelo forte - terraços holocênicos; em amarelo fraco - dunas; em bege - praias. A linha vermelha representa a linha de costa atual. Fonte: Adaptado de Souza (1999).

Durante o Holoceno médio (Zona VV-V), *Myrsine,* Arecaceae, W*einmannia, Hedyosmum, Sloanea* e *Clusia* tornaram-se mais freqüentes na floresta da planície. Condições climáticas mais úmidas podem ter sido o fator primário na alteração composicional da vegetação. Com o início da regressão marinha (início da Zona VV-V), áreas abertas tornaram-se arbóreas, iniciando a formação de uma densa cobertura de floresta ombrófila.

Já no Holoceno superior (Zona VV-VI) *Myrsine* foi menos freqüente. O aumento de Arecaceae pode indicar condições climáticas mais úmidas, enquanto a alta porcentagem de pólen de Poaceae no começo desta zona pode sugerir desflorestamento antrópico.

As amostragens de pólen moderno na área de estudo (BEHLING *et al.*, 1997; 2006) mostram um valor médio relativamente alto de *Tapirira* (25%) e baixos valores de *Weinmannia* (1,6%). Considerando que as amostras mais superiores do registro de Volta Velha apresentam 10% de *Tapirira* e 18% de *Weinmannia*, é sugerido que pólen da floresta moderna não tenha sido depositado nos sedimentos mais superiores do registro.

5.6.4.4. Sobre a evolução paleoambiental do quaternário costeiro da região entre o norte de SC e o sul de SP

No modelo de recontrução paleogeográfica dos terrenos desde o Pleistoceno, tanto para o setor da península de Superagüi quanto para o setor da planície de Itapoá é possível observar que a configuração atual dos terrenos quaternários costeiros é delineada sobretudo no quarto e quinto estádios de cada esboço. Esta janela temporal corresponde ao Holoceno Médio, principalmente após o Máximo Trangressivo, guardando correspondência com os Estádios V e VII do modelo evolutivo de Suguio e Martin (1987).

No caso da planície de Itapoá, onde havia informação paleoecológica disponível, foi possível levantar através do esboço de recontrução paleoambiental que também a composição dos sistemas vegetacionais atuais define-se a partir do Holoceno Médio pós Transgressão Santos, quando inicia a consolidação de uma densa cobertura de floresta ombrófila com espécies tropicais similares às atuais. Este recorte temporal também corresponde ao quarto e quinto estádios do esboço paleogeográfico desenvolvido, bem como aos Estádios V e VII do modelo evolutivo de Suguio e Martin (1987). No *core* palinológico de Volta Velha, o testemunho deste recorte temporal corresponderia à Zona VV-V e VI de Behling e Negrelle (2001).

Partindo do acima exposto, é possível sugerir que a distribuição e composição dos sistemas vegetacionais atuais de ambientes quaternários costeiros do domínio da Mata Atlântica teve sua configuração delineada por eventos ocorridos a partir do Holoceno Médio. Cabe ainda destacar que a distribuição destes sistemas vegetacionais parece ter sido bastante influenciada por eventos de mudança de nível do mar ocorridos no período.

5.7. Conclusões do capítulo

Esta última seção conclui o presente capítulo elencando as seguintes colocações finais, derivadas dos resultados obtidos nesta segunda parte do estudo de caso envolvendo os sistemas vegetacionais quaternários costeiros. Para permitir uma melhor avaliação da pesquisa, o texto está estruturado segundo as cinco hipóteses levantadas no início do capítulo.

Hipótese 1: *Sobre o modelo conceitual de gênese dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros do Brasil.*

Um modelo conceitual de formação do relevo nas planícies quaternárias do litoral foi desenvolvido, no qual a energia representa a variável independente que determina a quantidade absoluta de material sendo transportado (Q), bem como da proporção de Q sendo depositada (D). Em conjunto, estas duas variáveis dependentes, Q e D, determinam as taxas de construção da forma de relevo ($T_{máx}$). Com base neste modelo conceitual geral foi possível elaborar modelos de gênese dos sistemas vegetacionais para cada um dos tipos de ambiente de acumulação, correspondendo aos sistemas vegetacionais de acumulação fluvial, fluviomarinha, marinha e eólica.

Deste modo, a partir de um modelo geral e simples da dinâmica de formação das unidades geomorfológicas das planícies litorâneas, os diferentes estádios da evolução da vegetação dos sistemas azonais marinho, eólico, fluviomarinho e aluvial foram ordenadas em um eixo espaço-temporal determinado pela energia do processo morfogenético. Assumiu-se que, uma vez interrompida a morfogênese, tipos distintos de sistemas vegetacionais, com características diferentes ou convergentes, começam a evoluir até atingir uma configuração que, embora não seja similar em todos os casos, representa um tipo que pode ser considerado climáxico. Assim, refuta-se a idéia clementsiana de um só tipo de sistema vegetacionais climáxico para cada zona climática.

Ressaltou-se a necessidade de distinguir os ambientes em termos da dominância de processos morfogenéticos para facilitar o entendimento das múltiplas escalas de espaço e de tempo envolvidas na formação da grande heterogeneidade de sistemas vegetacionais quaternários costeiros.

As predições de distribuição dos sistemas vegetacionais de ambientes quaternários costeiros, derivadas do modelo elaborado para o recorte da faixa litorânea brasileira, foram avaliadas em escala de paisagem local e regional (região costeira entre o norte de SC e o sul de SP). Os resultados obtidos através de procedimentos de geoprocessamento, que possibilitaram comparar mapeamentos de vegetação e geologia-geomorfologia em escala regional e local, demonstraram boa concordância com as previsões derivadas do modelo conceitual de gênese dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros.

Assim sendo, corrobora-se a hipótese de que o modelo de gênese, baseado na premissa de que a vegetação (nos diferentes estádios de desenvolvimento do ecossistema) reflete as fases de construção do ambiente, constitui uma abordagem que permite interpretar os mosaicos vegetacionais do litoral brasileiro.

Por fim, enfatizamos a importância de analisar a complexa gama de processos geomorfológicos e pedológicos que se sucedem ao longo do tempo em um dado local, que devem ser o ponto de partida para compreender e interpretar a diversidade de comunidades vegetais e de ecossistemas que caracterizam as planícies litorâneas do Brasil.

Hipótese 2: *Sobre a distribuição dos sistemas vegetacionais do quaternário costeiro do Brasil e sua associação aos substratos geológico-geomorfológicos.*

Os resultados da avaliação das predições do modelo em escala regional, obtidos pelo cruzamento dos mapas de geologia-geormorfologia e de vegetação da região costeira entre o norte de SC e o sul de SP, revelaram um coeficiente de correlação V de Cramer de 0,71 ($p < 0,0001$), demonstrando haver boa correlação entre estes dois temas.

Do mesmo modo, os resultados da planimetria cruzada destes dois mapeamentos regionais, assim como aqueles da avaliação em paisagem local que comparou o arcabouço geológico e os levantamentos botânicos na península de Superagüi, ambos demonstraram haver boa congruência entre as classes de vegetação e de geologia-geomorfologia. As duas análises indicaram que a distribuição das Formações Pioneiras herbáceas e arbustivas está associada aos terrenos atuais e holocênicos mais recentes, sendo que os sistemas marinhos, fluviais e fluviomarinhos correspondem, respectivamente, a substratos de planícies marinhas, de depressões no interior destas e de planícies de maré. Também foi indicado que a ocorrência dos sistemas florestais mais desenvolvidos corresponde aos terraços mais antigos do Holoceno e Plesitoceno.

O conjunto destes resultados concorda com as predições de distribuição derivadas do modelo conceitual e permite corroborar a hipótese de que a distribuição dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros do Brasil está associada ao substrato de formação dos ambientes, existindo correlação entre os temas vegetação e geologia-geomorfologia.

Hipótese 3: *Sobre a distribuição geográfica de sistemas vegetacionais atuais em ambientes quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica e a evolução paleogeográfica dos terrenos.*

Como pode ser levantado ao longo da recontrução paleogeográfica dos terrenos desde o Pleistoceno, tanto para o setor da península de Superagüi quanto para o setor da planície de Itapoá, a configuração atual dos terrenos quaternários costeiros define-se a partir do quarto e quinto estádios do esboço desenvolvido, principalmente após a Trangressão Santos. Esta configuração dos terrenos reflete sobretudo as mudanças climáticas e de nível do mar ocorridas

nos últimos 7.000 anos, correspondendo a um recorte temporal que têm início no Holoceno Médio, correlacionado aos Estádios V e VII de Suguio e Martin (1987).

Assim sendo, corrobora-se a hipótese de que a distribuição geográfica de sistemas vegetacionais atuais dos ambientes quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica apresenta-se correlacionada à configuração de terrenos definida a partir do Holoceno Médio, com grande influência de mudanças de nível marinho.

Hipótese 4: *Sobre a composição de sistemas vegetacionais atuais em ambientes quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica e sua história paleoecológica.*

A partir do esboço de recontrução paleoambiental desenvolvido para o setor da planície de Itapoá foi possível levantar que também a composição dos sistemas vegetacionais atuais é delineada no quarto e quinto estádios do esboço evolutivo, sobretudo a partir após o Máximo Transgressivo, quando inicia a consolidação de uma densa cobertura de floresta ombrófila com espécies tropicais similares às atuais. Este período inicia no Holoceno Médio e corresponde aos Estádios V e VII de Suguio e Martin (1987), bem como aos testemunhos palinológicos da Zona VV-V e VI de Behling e Negrelle (2001). Os registros paleoecológicos sugerem que a área esteve sob influência de incursões marinhas até 6.100 A.P., sendo que desde o Holoceno médio uma densa floresta ombrófila com Myrtaceae, Arecaceae, Moraceae, *Alchornea*, *Myrsine* e *Weinmannia* vem se desenvolvendo no local. Já os manguezais parecem ter atingido o pleno desenvolvimento apenas em tempos modernos.

Estas indicações corroboram a hipótese de que a composição de sistemas vegetacionais atualmente presentes em substratos quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica define-se a partir do Holoceno Médio.

Hipótese 5: *Sobre a eficácia da abordagem em múltiplas escalas espaciais e temporais*

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo evidenciam que a abordagem multiescalar desenvolvida em ambiente de Sistema Geográfico de Informação possibilitou que os sistemas vegetacionais quaternários costeiros do Brasil fossem analisados e modelados quanto à sua gênese e distribuição, em uma estratégia que permitiu a inclusão dos seus fatores abióticos condicionantes envolvendo múltiplas escalas temporais e espaciais de formação dos mesmos.

Através do atributo de localização espacial, a abordagem multiescalar em SGI permitiu integrar informação de múliplas fontes, incluindo informação bibliográfica sobre condicionantes abióticos e bióticos, mapeamentos geológicos-geomorfológicos e de vegetação, levantamentos botânicos, registros paleogeográficos e paleoecológicos.

Esta estratégia permitiu que modelos de gênese para os sistemas vegetacionais quaternários costeiros fossem desenvolvidos para cada tipo de ambiente de acumulação, levando em conta os fatores de formação e as escalas de tempo envolvidas desde o Pleistoceno. As predições de distribuição dos sistemas vegetacionais, derivadas do modelo desenvolvido na escala sinóptica global da faixa litorânea brasileira, puderam ser avaliadas em escalas regional (norte de SC a sul de SP) e local, através de operações de geoprocessamento.

Os esboços de evolução paleogeográfica desenvolvidos para os setores da península de Superagüi e da planície de Itapoá possibilitaram analisar a configuração dos terrenos e a distribuição dos sistemas vegetacionais, desde as escalas temporais atual e histórica até as escalas milenar deglacial e orbital do pretérito geológico do Holoceno e Pleistoceno.

Em resumo, o conjunto destes resultados corrobora a hipótese de que a abordagem multiescalar desenvolvida em Sistema Geográfico de Informação permite transitar tanto nas escalas temporais do presente ao pretérito geológico (Holoceno e Pleistoceno), quanto nas escalas

espaciais desde a sinóptica global até a regional e local, representando, portanto, uma estratégia com bom potencial para auxiliar em análises sobre a evolução da distribuição de sistemas vegetacionais quaternários costeiros.

O uso de registros paleombientais de longo prazo e de abordagens envolvendo múltiplas escalas temporais além das atuais e históricas pode contribuir para melhorar o conhecimento sobre a variabilidade das condições pretéritas, a trajetória dos vários estados dos sistemas vegetacionais e sua vulnerabilidade aos eventos de mudança. Como bem destacado por Willis *et al*. (no prelo, a), este tipo de abordagem pode ser particularmente importante para fornecer uma plataforma conceitual e qualitativa sobre a qual possam ser examinadas iniciativas e estratégias atuais e futuras para a conservação e manejo da biodiversidade. Este tipo de embasamento adquire especial relevância no caso dos sistemas quaternários costeiros, sobretudo em vista dos impactos previstos em resposta às mudanças climáticas globais.

Capítulo 6

Nível de espécie e populações: distribuição geográfica e status de conservação

Trying to discover the laws that govern the abundance, distribution, and diversity of species is not for those who are timid or content to do easy science. But for those who are willing to think big, stretch themselves and persevere, I cannot think of any human endeavor that is more challenging and more fun.

James H. Brown

"That is the essence of science: ask an impertinent question, and you are on the way to a pertinent answer."

Jacob Bronowski

Este capítulo apresenta o segundo estudo de caso desenvolvido nesta tese, que abrange análises de distribuição geográfica e status de conservação em nível de organização biológica de espécie e populações. O estudo toma como elemento alvo o mico-leão-da-cara-preta (*Leontopithecus caissara*), abordando a sua distribuição em múltiplas escalas espaciais, desde a escala local (manchas de hábitat), de paisagem (manchas de população), de região (rede de populações) até a de bioma (espécie *in toto*). Na seção introdutória 6.1 encontram-se considerações sobre os temas mudanças globais e seu impacto sobre a distribuição e persistência de espécies e populações, sobre noções de distribuição geográfica e aspectos associados de complexidade e escala, bem como sobre os avanços na modelagem preditiva de espécies e populações. Em seções consecutivas são apresentados a abordagem, os objetivos e as hipóteses da pesquisa. No item 6.5 são descritas as fontes e métodos empregados, assim como os resultados iniciais referentes à criação de metodologias e formação da base de dados. Em 6.6 são apresentados os resultados principais e discussões a eles pertinentes. Por fim, na seção 6.7 são relacionadas as conclusões da pesquisa.

6.1. Considerações inicias

Conforme reiterado em partes anteriores desta tese, muitos dos padrões exibidos pela biodiversidade refletem processos que operam em múltiplas escalas espaciais e temporais, ao longo dos diferentes níveis de orgnização biológica.

Os dois capítulos precedentes abordaram a distribuição de sistemas quaternários costeiros em múltiplas escalas espaciais desde o local ao macrorregional, tratando com escalas temporais desde o tempo atual até o pretérito histórico (cap. 4) e geológico (cap. 5). Ambos capítulos desenvolveram-se em nível de organização biológica de ecossistema, tomando como estudos de caso os sistemas vegetacionais do quaternário costeiro da Mata Atlântica.

O presente capítulo trabalha a passagem para os níveis de organização biológica de espécie e população, tomando como estudo de caso um outro sistema quaternário costeiro, o mico-leão-da-cara-preta (*Leontopithecus caissara*). Este capítulo apresenta um estudo da distribuição atual deste primata através de uma abordagem que explora múltiplas escalas espaciais, desde a local até a regional (manchas de hábitat e populações) e global (espécie *in toto*). Adotando um arcabouço espacialmente explícito, baseado na Dinâmica Hierárquica de Manchas e construído em ambiente de Sistema Geográfico de Informação, o estudo analisou a distribuição, a estrutura espacial e *status* de conservação da espécie, de suas populações e de seus habitats, através da integração de procedimentos de geoprocessamento e ecoinformática.

6.1.1. MUDANÇAS GLOBAIS E O IMPACTO SOBRE A DISTRIBUIÇÃO E PERSISTÊNCIA DE ESPÉCIES E POPULAÇÕES

O século XXI teve início em meio a um panorama bastante sombrio em termos de erosão de biodiversidade ao nível de espécies e populações, fato que pode ser rapidamente constatado a partir das conclusões sumarizadas na Avaliação Ecossistêmica do Milênio, "Millennium Ecosystem Assessment - MEA" (MEA, 2005), algumas das quais são abaixo elencadas:

- Existem evidências de que em vários grupos taxonômicos boa parte das espécies apresenta tendência de declínio no contingente populacional e/ou na área de distribuição geográfica, sendo que estudos já demonstram este padrão em anfíbios, mamíferos africanos, aves em terras agrícolas, borboletas britânicas, corais do Caribe e Indo-Pacífico e peixes comumente utilizados pela pesca comercial.
- Ao longo dos últimos séculos, concomitante à ação antrópica, a taxa de extinção de espécies atingiu um nível de 100 a 1000 vezes superior aos níveis observados nos períodos anteriores da história do planeta.
- Com base nos critérios e na Lista Vermelha da União Mundial para a Conservação da Natureza (IUCN), entre 10 e 50 % das espécies dentro de grupos taxonômicos superiores bem estudados como mamíferos (23%), aves (12%), anfíbios (32%), coníferas (25%) e cicadáceas (52%) encontram-se atualmente ameaçados de extinção.
- A distribuição das espécies na Terra está ficando mais homogênea, sendo que as diferenças entre os conjuntos de espécies de distintas localidades estão, em média, diminuindo. Esta homogeneização biótica deve-se a altas taxas de extinção de espécies

restritas, à facilitação para o domínio de poucas espécies generalistas e à bioinvasão, a última mediada pelo aumento do comércio e da capacidade dos meios de transporte.

- A diversidade genética tem declinado globalmente, sobretudo entre espécies domesticadas.

O quadro torna-se mais preocupante pelo fato de que estas tendências de declínio de biodiversidade configuram-se ainda mais dramáticas em projeções de cenários futuros para este século (*e.g*. SALA, 2000; SCHARLEMANN *et al*., 2004; MEA, 2005; THUILLER *et al*., 2005a).

Na literatura pertinente ao tema erosão de diversidade biológica, os principais vetores apontados estão entre os seguintes fatores: destruição de hábitats derivada de modificação de uso do solo; mudanças climáticas; invasão biológica por espécies não-nativas e poluição (*e.g*. SALA, 2000; MEA, 2005). Estes estudos sinópticos apresentam consenso no sentido de indicar que as maiores ameaças enfrentadas pela biodiversidade terrestre consistem no efeito de duas mudanças globais: a *modificação de paisagens*, que deriva do desenvolvimento agrícola, da urbanização e de práticas silviculturais e as *mudanças climáticas* aceleradas, induzidas pelas atividades antrópicas.

Não é de hoje que um corpo substancial de evidências ressalta a importância das mudanças antrópicas no uso do solo como uma das causas principais do declínio populacional, contração de distribuição geográfica e extinção de espécies (*e.g*. CZECH e KRAUSMAN, 1997; DOBSON *et al*., 1997; WILCOVE *et al*., 1998; PIMM e RAVEN, 2000; BALMFORD *et al*., 2001).

Mais recentemente, muitos estudos têm destacado a influência de impactos das mudanças climáticas, induzidas pelo homem, sobre a persistência de espécies, com base

tanto em efeitos já documentados como em projeções para o futuro (PARMESAN e YOHE, 2003; ROOT *et al*., 2003; 2005; WALTHER *et al*., 2005; LAVERGNE *et al*., 2006; POUNDS *et al*., 2006; HUNTLEY *et al*., 2006; PARMESAN , 2006; PAULI *et al*., 2006; ARAÚJO e RAHBEK, 2006).

Para vários autores (ROOT *et al*., 2003; OPDAM e WASCHER, 2004; MEA, 2005) um dos principais desafios para a conservação da biodiversidade emerge da sinergia entre estes dois vetores de mudança global, ou seja, do efeito combinado que rápidas alterações climáticas e substantiva fragmentação de hábitat exercerão sobre a distribuição e a persistência de espécies e populações.

Em função desta crise contemporânea da biodiversidade e da dimensão das mudanças ambientais projetadas para este século, urge a necessidade de adotar estratégias de mitigação e adaptação que possam minimizar as tendências de erosão da diversidade biológica. Contudo, a adoção de tais estratégias em boa parte depende do entendimento e da capacidade de predição sobre a distribuição dos elementos da biodiversidade, tanto na situação atual quanto em cenários retrospectivos e futuros. Estas demandas da sociedade incidem sobre uma questão fundamental que há séculos desafia as ciências naturais a responder perguntas como: Por que as espécies encontram-se distribuídas como estão?; Por que existem espécies tão restritas geograficamente enquanto outras apresentam ampla distribuição?; O que determina o limite da distribuição das espécies?

Responder a tais questionamentos desde há muito tempo têm sido um dos objetivos principais do campo interdisciplinar da Biogeografia, em ambas as suas subdivisões, histórica e ecológica. Embora desde seu início no século XVIII a Biogeografia tenha uma ampla tradição de disciplina descritiva dos padrões de distribuição dos seres vivos, um avanço considerável foi alcançado no final do século XX, com a consolidação de novos

arcabouços teóricos e de metodologias de análise, bem como de intrumentação quantitativa (ver LLORENTE *et al*., 2001; LOMOLINO *et al*., 2004; 2006; LOMOLINO e HEANEY, 2004). Já no início do século XXI, como um dos resultados deste contexto onde grandes demandas da agenda de conservação frente a mudanças globais pressionam fortemente a investigação sobre a distribuição dos elementos da biodiversidade, merece destaque o reconhecimento formal da existência de uma nova área científica, denominada *Biogeografia da Conservação*. De acordo com a definição proposta por Whittaker *et al*. (2005), esta área de recente emergência caracteriza-se pela "aplicação de princípios, teorias e instrumentos analíticos da Biogeografia - concernentes à dinâmica de distribuição dos taxa, individual ou coletivamente - no tratamento de questões relativas à conservação da biodiversidade".

Não há dúvidas de que, ao longo de suas trajetórias científicas, tanto a Biogeografia quanto a Ecologia têm progredido de forma significativa no sentido de aumentar o entendimento dos fatores que afetam a distribuição das espécies. Contudo, alcançar a habilidade de predizer como os impactos das mudanças globais serão refletidos na distribuição da biodiversidade constitui um enorme desafio para os cientistas, face à complexidade e às inúmeras fontes de incerteza que permeiam a questão.

6.1.2. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE ESPÉCIES, COMPLEXIDADE E ESCALA

Embora a distribuição geográfica das espécies seja um tema fundamental para estudos biogeográficos e atividades de conservação e manejo da biodiversidade, é fato que para muitos taxa o conhecimento sobre a distribuição global, regional e mesmo local permanece bastante precário. Este problema, conhecido como Impedimento Wallaceano

("Wallacean shortfall" como nomeado por Lomolino, 2004), é especialmente severo nas regiões que apresentam maior biodiversidade, tais como as regiões tropicais.

O entendimento da distribuição geográfica de uma espécie constitui matéria nada trivial, sendo que este fenômeno representa a manifestação de interações complexas entre processos intrínsecos (relativos aos organismos) e extrínsecos (referentes ao seu ambiente), os quais operam em múltiplas escalas. Entre as características intrínsecas dos organismos encontram-se especialmente as suas tolerâncias ambientais, seus requerimentos de recursos e seus atributos de história de vida, de demografia e de dispersão, enquanto que entre as características do seu ambiente extrínseco figuram, em particular, aquelas cuja variação no espaço e no tempo limitam a distribuição e a abundância (BROWN *et al*., 1996).

Apesar da importância do tema, o próprio conceito de área de distribuição geográfica poucas vezes tem sido objeto de reflexões mais aprofundadas, sendo que em grande parte da literatura biogeográfica o conceito aparece de forma meramente intuitiva e implícita (ZUNINO, 2000).

Em termos conceituais, a *área de distribuição geográfica* de uma espécie pode ser definida como a *fração do espaço geográfico em que tal espécie está presente e interage de maneira não efêmera com os componentes do ecossistema* (ZUNINO e PALESTRINI, 1991; ZUNINO, 2000; ZUNINO e ZULLINI, 2003). Faz-se necessário ressaltar que estas interações entre a espécie e os componentes do ecossistema constituem verdadeiras relações ou conexões, conforme entendidas segundo a abordagem sistêmica, ou seja, representam inter-relações que afetam os elementos em ambos os sentidos (espécie ↔ ambiente).

Nesta linha de raciocínio de Zunino e colaboradores, tendo em vista a condição de inter-relacionamento entre a espécie e seu entorno, pode-se afirmar que a presença da

espécie outorga o status de área de distribuição ao espaço geográfico que ocupa. Conseqüentemente, assim com a espécie tem propriedades ontológicas e genealógicas, também a área de distribuição encontra-se provida de uma realidade, tanto ontológica como genealógica. Dentro deste enfoque a evolução da área de distribuição pode ser entendida como uma seqüência de etapas sucessivas (fig. 6.1), entre as quais ocorrem nexos, que envolvem inclusive fatores de ordem causal (ZUNINO, 2000). Como estas etapas foram denominadas de "*nemoforontes*" (= portadores de lugares), a *área de distribuição* seria então definida como *a máxima seqüência de nemoforontes que mantém entre si uma relação exclusiva ancestro-descendente* (ZUNINO, 1999; 2000). A interrupção desta continuidade relacionada à especiação coincide com a extinção da área de distribuição como tal, convertendo os espaços ocupados pelas populações em processo de divergência nos nemaforontes ancestrais das duas novas áreas de distribuição (ZUNINO, 2000). Vale mencionar que o termo "nemoforontes", empregado para as etapas sucessivas da área de distribuição, guarda paralelo com o conceito de "semaforontes" (= portadores de caracteres), cunhado por Henning (1968) para designar as distintas etapas ontogenéticas do indivíduo, bem como com aquele de "eidoforontes" (= portadores de imagem), proposto por Papavero e Llorente (1992) para indicar as etapas evolutivas de uma espécie em anagênese (ZUNINO, 2000).

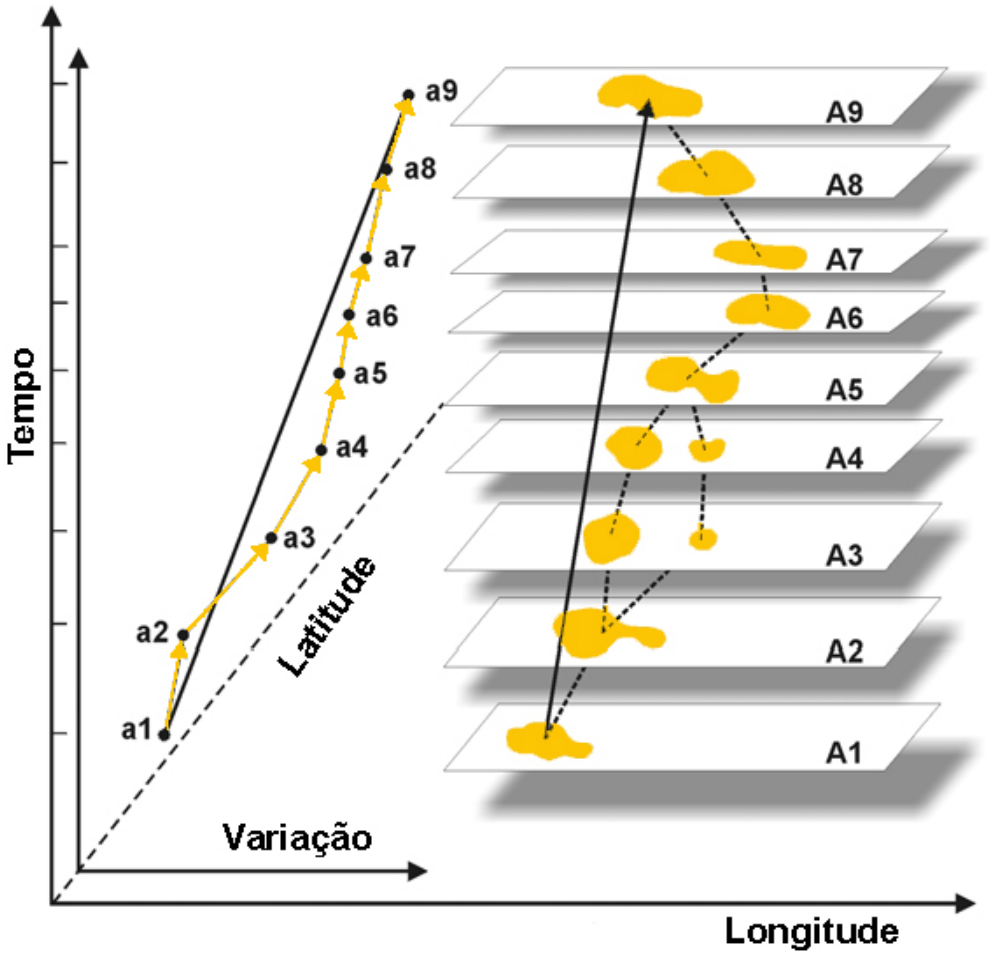


Figura 6.1. Esquema da seqüência de estapas sucessivas (*nemoforontes*) da área de distribuição **A** da espécie **a**. Em ambas, o segmento que conecta a primeira e a última etapa da seqüência representa a somatória (vetorial) de todas as variações ocorridas no lapso temporal considerado. Fonte: Modificado de Zunino, 2000.

Ainda dentro de uma abordagem sistêmica, na concepção de Maurer (2005), a somatória de todos os organismos individuais pertencentes a uma única espécie, vivendo em um determinado lapso de tempo, define um sistema agregado que apresenta limites espaciais relativamente discretos, reconhecíveis. Tais limites espaciais conformam a área de distribuição geográfica da espécie, dentro da qual os indivíduos organizam-se em agregados

(populações) conforme o seu grau de conexão, sendo que a somatória de todos estes indivíduos constitui o *sistema geográfico populacional* da espécie. Neste sentido, a evolução da diversidade biológica pode ser encarada do ponto de vista das linhagens evolutivas da espécie como agregados de organismos individuais que existem dentro de regiões geograficamente restritas. Dentro esta perspectiva, o microssistema descreveria o comportamento de organismos individuais, enquanto o macrossistema descreveria o comportamento de grandes coleções de espécies genealogicamente relacionadas.

O sistema geográfico populacional de uma espécie estrutura-se em um contexto espacial, pois os organismos individuais vivem em um ambiente que via de regra exibe considerável heterogeneidade espacial. Considerando o contexto espacial, pode-se dizer que existem ao menos dois processos principais que conectam populações locais para formar agregados de populações geográficas: a migração entre populações locais e a variação geográfica nas taxas vitais das populações (MAURER, 2005). Estes processos, sobretudo a migração, apresentam o potencial para correlacionar e/ou integrar as dinâmicas das populações locais em uma população geográfica. De acordo com o grau de correlação entre as dinâmicas das populações locais, o sistema geográfico populacional de uma espécie pode encontrar-se em alguma situação entre a completa panmixia e o completo isolamento de todas as populações, sendo que a maioria das populações geográficas situa-se entre estes dois extremos.

Entre estas diversas situações apresentadas pelos sistemas geográficos populacionais globais de uma espécie encontram-se os arranjamentos denominados de metapopulações. Em metapopulações regionais, sistemas de populações locais em manchas discretas de hábitat favorável interagem via dispersão de indivíduos, que se movem na matriz da paisagem. Tais sistemas são tamponados contra a extinção regional através de

fluxo gênico entre populações locais, efeitos resgate ou recolonização após extinção local (BAGUETTE, 2004). Para que a população regional de uma espécie persista como uma metapopulação, quatro condições necessitam ser mantidas (HANSKI, 1997): (1) o hábitat favorável deve ocorrer em manchas discretas que podem ser ocupadas por populações locais reprodutivas; (2) até as maiores populações locais devem apresentar um risco de extinção mensurável (a menos que a maior população seja a fonte de um sistema fonte-escoadouro, "source-sink sistem"); (3) as manchas de hábitat não devem ser demasiado isoladas para não impedir a recolonização após extinções locais; e (4) as populações locais não devem apresentar dinâmicas em completa sincronia, pois do contrário a dinâmica da população global não seria muito mais longa do que aquela das populações locais.

Partindo de tudo o que foi acima exposto, pode-se considerar que áreas de distribuição geográfica são sistemas macroscópicos, já que as dinâmicas das populações em seu interior são coordenadas tanto por restrições internas (adaptações de indivíduos dentro de populações) quanto por restrições externas (variação geográfica em condições ambientais), conforme indicado por Maurer (2005). Assim sendo, a área de distribuição geográfica de uma espécie constituiria um sistema complexo, refletindo processos que operam em múltiplas escalas espaciais, temporais e de organização biológica (tab. 6.1). Tais interações produzem padrões espaciais que são observados em diferentes escalas, freqüentemente de maneira hierárquica (PEARSON et al., 2004; GUISAN e THUILLER, 2005).

Tabela 6.1. Processos envolvidos na configuração da área de distribuição geográfica de uma espécie, bem como respectivas escalas associadas.

	nível de organização biológica			
	indivíduo ou grupo familiar	***população***	***metapopulação ou rede regional de populações***	***espécie***
amplitude dos fluxos	internos ao "home-range"	internos à população	internos à metapopulação	externos à metapopulação
amplitude e freqüência dos movimentos	dispersão local de curta distância e de muito alta freqüência	dispersão local de média distância e de média freqüência	dispersão regional de média distância e de baixa freqüência	dispersão regional de longa distância e de muito baixa freqüência
dinâmica dos processos	local	local	regional	global
processos biológicos	processos semióticos e cognitivos para alimentação, proteção e reprodução	natalidade e mortalidade; imigração e emigração; adaptação local; diferenciação local	extinção local e colonização local; adaptação regional; diferenciação regional	extinção e colonização regional; extinção global; adaptação global; especiação
processos areais	expansão e contração no "home-range"	estabelecimento e colapso de "home-ranges"; expansão e contração na mancha habitada pela população	colapso e estabelecimento de manchas de populações; contração e expansão na área de distribuição geográfica	colapso, disjunção, adjunção, transposição e partição na área de distribuição geográfica

Ressalta-se que a ocorrência de uma espécie em um dado espaço geográfico é determinada por cinco grupos de fatores, relacionados a seguir (parcialmente com base em GUISAN e THUILLER, 2005; SOBERÓN e PETERSON, 2005; SOBERÓN, no prelo):

(1) As *condições abióticas*, incluindo clima, ambiente físico, condições edáficas etc., que impõem restrições fisiológicas para a permanência da espécie em dada área. Constituem as variáveis independentes de densidade, por vezes denominadas variáveis de condição,

reguladoras ou cenopoéticas, que via de regra se configuram em extensão e resolução espaço-temporal mais ampla, de menor detalhe.

(2) Os *fatores bióticos*, compondo o conjunto de interações com outras espécies que modificam a capacidade de manter populações (*e.g*. competidores, predadores, mutualistas, patógenos). Representam as variáveis dependentes de densidade, conhecidas como variáveis de recurso ou bionômicas, que em geral definem-se em extensão e resolução espaço-temporal mais estreita, de maior detalhe.

(3) As condições de *acessibilidade da área*, que dependem da configuração da paisagem e das habilidades de dispersão da espécie.

(4) As *capacidades evolutivas* das populações da espécie para adaptação a novas condições e/ou para diferenciação.

(5) O padrão dos *distúrbios no ambiente*, a extensão, freqüência e severidade dos eventos impactantes, sejam estes de origem natural ou antrópica.

Dentre estes grupos de fatores, os três primeiros são fundamentais para entender os relacionamentos entre áreas distribucionais e nichos (SOBERÓN, no prelo). A figura 6.2 exibe uma representação estática da relação destes fatores na determinação dos locais de ocorrência das populações de uma espécie e de sua área de distribuição geográfica.

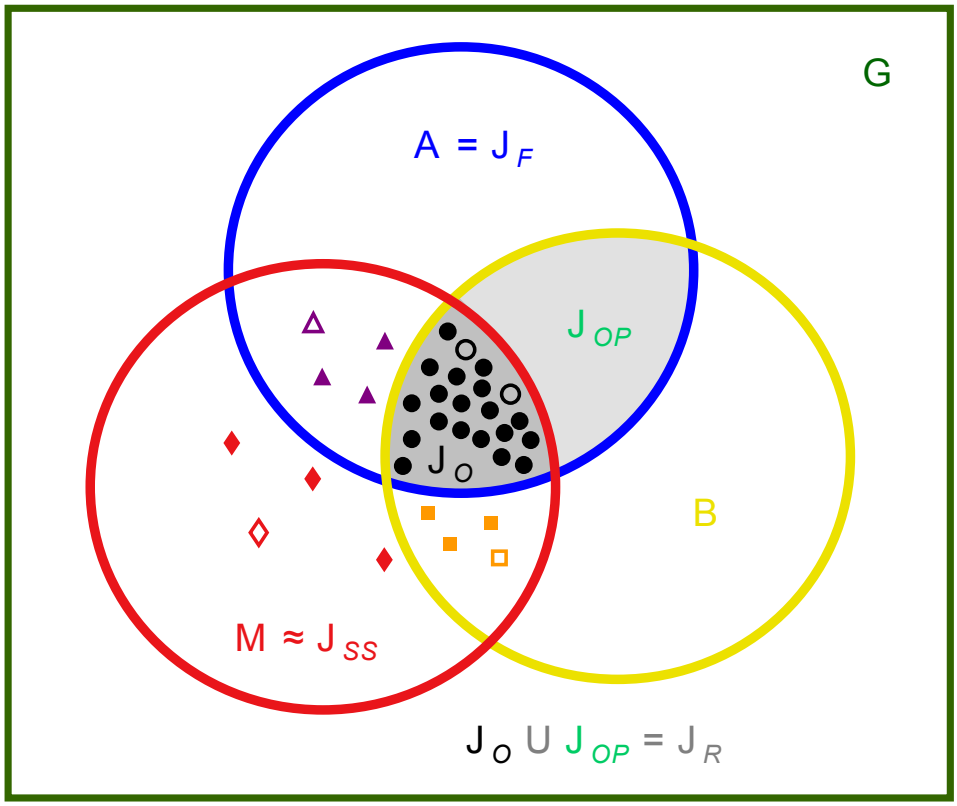


Figura 6.2. Diagrama de Venn mostrando uma representação heurística de fatores que afetam a distribuição geográfica de uma espécie. ***G*** representa a área total de estudo. ***A* = *J*$_F$** representa a área geográfica onde a taxa de crescimento intrínseca da espécie seria positiva. ***B*** representa a área geográfica onde a espécie pode excluir ou coexistir com competidores. ***M*** representa a área total que foi ou é acessível à espécie dentro de um período de tempo de interesse. Os *círculos sólidos* representam populações fonte ("source"). Os *triângulos sólidos* são populações escoadouro ("sink") com taxas de crescimento negativas devido à exclusão competitiva. Os *quadrados sólidos* representam populações escoadouro ("sink") devido à taxas de crescimento negativas de ordem intrínseca. Os *losangos sólidos* são combinações dos dois anteriores. Os *círculos*, *triângulos*, *quadrados* e *losangos vazados* representam locais vazios onde populações dos tipos respectivos foram extintas por distúrbios. ***J*$_R$**, que muitas vezes é assumido como a união da *área ocupada* (***J*$_O$**) com a *área ocupada potencial* (***J*$_{OP}$**), representa toda a região em G onde ambas as variáveis cenopoéticas e bionômicas são adequadas para a espécie, a despeito dos movimentos. ***J*$_{SS}$** é a área onde indivíduos da espécie podem ser encontrados, sejam as populações fontes ou escoadouros. Por definição, ***M*** equivaleria a ***J*$_{SS}$**. Modificado de Soberón, no prelo.

Não obstante, estes fatores não atuam de maneira estática, mas interagem dinamicamente, operando com diferentes intensidades em distintas escalas, o que acaba por determinar a área de distribuição de uma espécie. Pode-se ainda considerar que esta entidade fluida e complexa, conhecida como área de distribuição, constitua a expressão conjunta da natureza ecológica e da história evolutiva da espécie, impressa no espaço geográfico (BROWN, 1996; MACKEY e LINDENMAYER, 2001; GASTON, 2003; PEARSON e DAWSON, 2003; SOBERÓN e PETERSON, 2005). A distribuição geográfica da espécie constituiria, portanto, uma propriedade emergente da espécie (JABLONSKI *et al.* 1985).

6.1.3. AVANÇOS NA MODELAGEM PREDITIVA DE ESPÉCIES E POPULAÇÕES

Conforme explanado no item anterior, tendo em vista as dificuldades oriundas da natureza complexa, multiescalar e da inerente espacialidade relacionadas à temática da distribuição geográfica de espécies e populações, não é de surpreender que este tipo de predição constitua um desafio para os cientistas. Assim sendo, para entender, modelar e predizer a ocorrência destes elementos, de modo a fornecer sólido apoio à decisão em gestão da biodiversidade, torna-se fundamental adotar abordagens integradas, espacializadas e capazes de permitir a passagem de escalas. Neste sentido, a modelagem preditiva de distribuição pode ser particularmente auxiliada pelos avanços ocorridos em três áreas de rápido desenvolvimento nas duas últimas décadas: as Ciências da Geoinformação, a Inteligência Artificial e a Ecoinformática.

Na história da modelagem de distribuição, quantificar o relacionamento da distribuição espacial de espécies com fatores bióticos e abióticos constitui uma temática de

longa data na Ecologia , sendo que a modelagem matemática tem sido uma das principais ferramentas empregadas para medir e prever essa relação (PHILLIPS *et al*., 2006; RUSHTON *et al.*, 2004; GUISAN e ZIMMERMANN, 2000).

Em um contexto de grandes avanços na computação e na estatística, os *modelos de distribuição de espécies* (*"Species Distribution Models - SDMs"*) atingiram sua terceira fase de evolução nestas duas últimas décadas, marcada pela modelagem estatística, empírica e espacialmente explícita da distribuição de espécies (GUISAN e THUILLER, 2005). Estes SDMs são modelos empíricos e relacionam observações de campo com variáveis ambientais explicativas, sendo fundamentados em premissas estatísticas ou teóricas para gerar a superfície de resposta ou mapa temático de saída (GUISAN e THUILLER, 2005). As denominações *modelos de nicho ecológico* (*"Ecological Niche Models - ENMs"*) e *modelos de hábitat* também são empregadas para designar esta classe de modelos.

Tais métodos de modelagem preditiva buscam definir as limitações ambientais das espécies nas dimensões para as quais o modelo é desenvolvido. Assim, a informação relacionadas aos registros de ocorrência pode ser analisada no espaço ecológico e projetada no espaço geográfico. Deste modo os algoritmos identificam, na área geográfica em análise, locais com características ambientais similares aos pontos de ocorrência, indicando onde as espécies são potencialmente capazes de manter populações (PETERSON e VIEGLAIS, 2001). O desenvolvimento de metodologias, técnicas e algoritmos para modelagem preditiva de distribuição vem crescendo como um ramo destacado dentro da Informática para Biodiversidade. Nesta área, parece bastante promissor o emprego de novas abordagens estatísticas e métodos de Inteligência Artificial e de Aprendizado de Máquina, tais como a modelagem baseada em algoritmo de Máxima Entropia, que constituem

modelos mais flexíveis e que podem apresentar melhor performance no tratamento de problemas ou conjuntos de dados complexos.

As técnicas de modelagem podem instrumentar várias aplicações em estudos biogeográficos, ecológicos e em conservação e manejo da biodiversidade, tais como: testar hipóteses biogeográficas, ecológicas e evolutivas (LEATHWICK,1998; ANDERSON *et al*., 2002; RICE *et al*., 2003; GRAHAM *et al*., 2004b; KNOUFT *et al*., 2006, BONACCORSO *et al*., 2006); analisar diversidade e composição de comunidades a partir de predições individuais de espécies (LEATHWICK *et al*.,1996; GUISAN e THEURILLAT, 2000; FERRIER *et al*., 2002); avaliar a invasão e proliferação de espécies (PETERSON e VIEGLAIS, 2001; PETERSON *et al*., 2003a; b; THUILLER *et al*., 2005b; THUILLER *et al*., 2006a); estudar distribuição de vetores e possíveis rotas de disseminação de doenças infecciosas (PETERSEN e ROEHRIG 2001; PETERSON *et al.* 2002b; PETERSON *et al.* 2004a; b; PETERSON *et al.* 2006); avaliar o impacto de mudanças climáticas, de uso da terra e outras mudanças ambientais sobre a distribuição das espécies (SALA *et al*. 2000; PETERSON *et al.* 2002a; THOMAS *et al*., 2004; THUILLER, 2004; THUILLER *et al*., 2006b); auxiliar na determinação de áreas prioritárias para conservação (FERRIER, 2002; CHEN e PETERSON, 2002; ORTEGA-HUERTA e PETERSON, 2004; ARAÚJO *et al*., 2004; SÁNCHEZ-CORDERO *et al*., 2005; MARTÍNEZ *et al*., 2006; PAPES, 2006).

No caso de espécies pouco conhecidas, raras e/ou ameaçadas de extinção, o emprego de modelagem pode ser de grande valia para otimizar a base de conhecimento e apoiar a decisão sobre estratégias de recuperação e manejo de espécies e populações. As técnicas de modelagem podem auxiliar, entre outras ações, a delimitar a distribuição geográfica destes tipos de espécies e indicar locais não inventariados e com alto potencial

para sustentar populações ainda não conhecidas (RAXWORTHY *et al*., 2003; ENGLER *et al*., 2004; GAUBERT *et al*., 2006; GUISAN *et al*., 2006); mapear locais favoráveis para reintrodução e/ou translocação (PEARCE e LINDENMAYER, 1998; GLENZ *et al*., 2001; POWELL *et al*., 2005); apontar áreas prioritárias para a conservação (IRFAN-ULLAH *et al*., no prelo); indicar áreas para recuperação de hábitats (LEHMANN *et al*., 2002; MIDGLEY *et al*., 2002); avaliar extinção de populações (BOND *et al*., 2006).

A adoção de abordagens espacializadas para trabalhar informação referente à distribuição de espécies e populações é uma necessidade, sobretudo quando se trata de espécies raras e ameaçadas de extinção. Na atualidade, não só para estas espécies como também para muitas outras, a distribuição do hábitat potencialmente disponível encontra-se configurada em mosaico fragmentado, onde as populações estão estruturadas em conjuntos de populações geográficas mais ou menos isoladas, sendo esta rede composta por um sistema interativo de manchas de populações locais que sofrem extinção e que são recolonizadas. Conseqüentemente, não é apenas a quantidade de hábitat potencialmente disponível que tem importância para a análise de sua distribuição geográfica e de sua vulnerabilidade, pois neste caso o caráter geométrico de sua distribuição e o aspecto dinâmico do fluxo de seus indivíduos entre os nós de uma rede de manchas habitáveis torna-se fundamental. Neste sentido, sobretudo no que se refere à fragmentação dos hábitats e à estruturação geográfica das populações, o espaço assume importante papel na caracterização da distribuição e do status de conservação de uma espécie.

Sob o prisma tecnológico, a superação das dificuldades de incorporar o espaço nas análises de manejo de recursos e conservação da biodiversidade tem sido auxiliada pelos benefícios provenientes de duas tecnologias em particular: o geoprocessamento e o sensoriamento remoto (LORINI *et al.*, 2005; LORINI *et al*., 1996). Estas novas capacidades de

análise espacial proporcionaram meios de modelar diretamente os hábitats potenciais de elementos bióticos alvo. De fato, a coleta de dados ambientais para modelagem de distribuição de espécies sofreu uma grande mudança na década de 90 quando imagens de sensoriamento remoto se tornaram amplamente acessíveis. Tais disponibilidades, acompanhadas do crescimento do uso de sistemas geográficos de informação como estruturas espacializadas eficientes no armazenamento e tratamento de dados georreferenciados, levaram a uma expansão no uso dos SDMs. O sensoriamento remoto também tornou possível o estudo de áreas mais extensas e de locais de difícil acesso (GUISAN e THUILLER, 2005; RUSHTON *et al*., 2004).

Assim sendo, as facilidades associadas aos avanços das tecnologias de computação e informação, das geotecnologias, da matemática, da estatística e da inteligência artificial parecem ter aberto novos horizontes para os estudos de sistemas complexos ambientais, com grandes possibilidades de aplicação para temas relativos à conservação e manejo de recursos bióticos (LORINI *et al*., 1996; 2005; GREEN *et al*., 2005).

6.2. Abordagem e motivação da pesquisa

Em países como o Brasil, dotados de megadiversidade biológica, de dimensões continentais e de graves problemas de degradação ambiental, são necessárias respostas rápidas para problemas relacionados a políticas ambientais, tais como a escolha de áreas prioritárias para a conservação. Para que tais decisões possam ser tomadas sobre uma base sólida de conhecimento, torna-se necessário o desenvolvimento de instrumentos, com

acurácia e incertezas mensuráveis, que auxiliem no tratamento dos dados disponíveis e na geração de nova informação deles derivada (SIQUEIRA, 2005). Dentro deste contexto, é surpreendente que no país ainda seja pouco expressiva a aplicação de geoprocessamento em análises de hábitat e distribuição de elementos bióticos alvo (espécies ameaçadas de extinção, raras ou endêmicas; espécies chave para os ecossistemas; espécies indicadoras de algum fenômeno de interesse; espécies de importância econômica ou cultural etc), bem como o seu emprego na área de conservação e manejo de recursos bióticos.

Considerando as potencialidades da modelagem preditiva de distribuição de espécies e das análises espaciais auxiliadas por Sistemas Geográficos de Informação, este estudo teve como foco o desenvolvimento de uma metodologia de aplicação da tecnologia de geoprocessamento para analisar a estrutura e conservação do hábitat do mico-leão-da-cara-preta, utilizando uma abordagem de população geográfica. Assim sendo, neste capítulo procurou-se desenvolver os procedimentos de análises de hábitat como um instrumento de apoio à decisão, de modo a contribuir para ações de manejo e conservação do conjunto das populações de *L. caissara*.

Descrito apenas em 1990, o mico-leão-da-cara-preta tem papel emblemático na temática da biodiversidade do Brasil, representando um dos 25 primatas mais ameaçados do mundo e uma espécie flâmula e guarda-chuva para a conservação da Mata Atlântica no litoral sul. Em função destas características, a metodologia desenvolvida aborda análises de staus de conservação segundo conceitos e critérios da IUCN (2001).

Embora o estudo de caso apresentado envolva a distribuição e status de conservação de uma espécie ameaçada de extinção, a abordagem aqui desenvolvida, alinhada à Biogeografia da Conservação, aplica-se a qualquer elemento biótico alvo (*e.g.* espécies chave, de uso econômico, vetores de doenças, invasoras, ameaçadas etc.).

O presente estudo foi conduzido no sentido de desenvolver um arcabouço hierárquico e multiescalar que permitisse transitar desde a escala local (manchas de hábitat) até a macrorregional de bioma (espécie *in toto*), possibilitando assim as análises da distribuição geográfica e do status de conservação da espécie alvo e de seu hábitat.

6.3. Objetivos da pesquisa

- Levantar os registros de ocorrência do elemento biótico alvo, *Leontopithecus caissara*.
- Construir uma base de dados geocodificados que permita estabelecer relacionamentos entre a espécie alvo e seu ambiente e posteriormente estabelecer relações entre a sua ocorrência e a de variáveis ambientais.
- Diagnosticar as associações entre características descritoras do ambiente e registros de ocorrência da espécie.
- Testar algoritmos de aprendizagem de máquina por abordagem de Máxima Entropia para modelagem preditiva de distribuição.
- Desenvolver um modelo preditivo de distribuição para o elemento biótico alvo em um arcabouço que possibilite a passagem pelas escalas local (manchas de hábitat), de paisagem, de região (populações) e de bioma ou global (espécie *in toto*), bem como permita avaliar o seu grau de endemismo.
- Estimar a área de distribuição geográfica da espécie, em termos de sua extensão de ocorrência e área de ocupação.

- Caracterizar a distribuição geográfica da espécie em termos de sua estrutura espacial, considerando o estado de conectividade, fragmentação e composição das manchas habitáveis (localidades das populações).
- Classificar o status de conservação da espécie.
- Analisar o status de proteção do hábitat da espécie e identificar áreas favoráveis que não estejam adequadamente protegidas e possam ser utilizadas em estratégias de manejo e recuperação da espécie.

6.4. Hipóteses da pesquisa

Hipótese 1: *Sobre o desempenho de técnicas de modelagem preditiva de distribuição*

1 - H_0: Dado um conjunto de variáveis preditoras e outro de observações de ocorrência, técnicas de modelagem de distribuição não podem gerar mapas de hábitat potencial para a espécie alvo com performance superior a uma distribuição gerada ao acaso.

1 - H_1: Dado um conjunto de variáveis preditoras e outro de observações de ocorrência, técnicas de modelagem de distribuição podem gerar mapas de hábitat potencial para a espécie alvo com performance superior a uma distribuição gerada ao acaso.

Hipótese 2: *Sobre o desempenho de algoritmos de aprendizagem de máquina para modelagem de distribuição*

2 - H_0: Modelos de distribuição baseados em algoritmos de aprendizagem de máquina pela abordagem de Máxima Entropia não apresentam melhor performance do que os produzidos por modelos de envelopes bioclimáticos (Bioclim, Domain) e por algoritmos tradicionais paramétricos como LDA de Fisher (análise Linear Discriminante).

2 - H_1: Modelos de distribuição baseados em algoritmos de aprendizagem de máquina pela abordagem de Máxima Entropia apresentam melhor performance do que os produzidos por modelos de envelopes bioclimáticos (Bioclim, Domain) e por algoritmos tradicionais paramétricos como LDA de Fisher (análise Linear Discriminante).

Hipótese 3: *Sobre a importância das variáveis ambientais preditoras na distribuição modelada para a espécie em distintas escalas*

3 - H_0: Dado o padrão dos registros de ocorrência documentados, as variáveis preditoras identificadas como de maior importância não diferem segundo a escala de modelagem.

3 - H_1: Dado o padrão dos registros de ocorrência documentados, as variáveis preditoras identificadas como de maior importância diferem segundo a escala de modelagem, sendo que em escala de maior extensão e menor resolução destacam-se variáveis climáticas, enquanto que em escala de maior resolução e menor extensão figuram descritores de paisagem como as variáveis biótico-antrópicas de cobertura do solo.

Hipótese 4: *Sobre a associação do padrão de ocorrência da espécie e de variáveis ambientais*

4 - H_0: O padrão de ocorrência de *Leontopithecus caissara* não coincide com um perfil de especialista de hábitat relacionado a sistemas arbóreos do quaternário costeiro.

4 - H_1: O padrão de ocorrência de *Leontopithecus caissara* coincide com um perfil de especialista de hábitat relacionado a sistemas arbóreos do quaternário costeiro.

Hipótese 5: *Sobre a distribuição geográfica e grau de endemismo da espécie*

5 - H_0: A distribuição geográfica de *Leontopithecus caissara* não corresponde a um alto grau de endemismo associado a sistemas arbóreos quaternários costeiros da região litorânea entre o norte do Paraná e sul de São Paulo.

5 - H_1: A distribuição geográfica de *Leontopithecus caissara* apresenta-se bastante restrita, correspondendo a um alto grau de endemismo associado a sistemas arbóreos quaternários costeiros da região litorânea entre o norte do Paraná e sul de São Paulo.

Hipótese 6: *Sobre o status de conservação do mico-leão-da-cara-preta*

6 - H_0: O status de conservação global da espécie não pode ser associado à categoria *Em Perigo Crítico de Extinção (Critically Endangered - CR)* de acordo com a classificação da IUCN (2001).

6 - H_1: O status de conservação global da espécie pode ser associado à categoria *Em Perigo Crítico de Extinção (Critically Endangered - CR)* de acordo com a classificação da IUCN (2001).

Hipótese 7: *Sobre a eficácia da abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação*

7 - H_0: A abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação não permite transitar nas escalas escalas local (mancha de hábitat), de paisagem (população), de região (redes de populações) e de bioma ou global (espécie *in toto*) em análises de distribuição geográfica e status de conservação do elemento alvo, *Leontopithecus caissara*.

7 - H_1: A abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação permite transitar nas escalas escalas local (mancha de hábitat), de paisagem (população), de região (redes de populações) e de bioma ou global (espécie *in toto*) em análises de distribuição geográfica e status de conservação do elemento alvo, *Leontopithecus caissara*.

6.5. Materiais e métodos

Tomando o mico-leão-da-cara-preta como estudo de caso, cumpre ressaltar que todo o desenvolvimento da metodologia desenvolvida neste capítulo foi construído no sentido de analisar a constituição e a estrutura espacial do hábitat de *L. caissara*, bem como seus reflexos sobre o status de conservação da espécie e suas implicações para o manejo ambiental.

A proposta metodológica aqui desenvolvida está estruturada segundo o encadeamento das atividades de investigação que estão relacionadas a partir deste ponto.

6.5.1. INVENTÁRIO DE FONTES BIBLIOGRÁFICAS E CARTOGRÁFICAS

Esta etapa consistiu na busca das fontes primárias e secundárias que formaram a base para construir os planos de informação utilizados para analisar a distribuição geográfica de *Leontopithecus caissara*, bem como em levantamento bibliográfico referente à modelagem de distribuição. Para efetuar estes levantamentos utilizou-se a consulta a bibliotecas e mapotecas de instituições de pesquisa (*e.g.* universidades etc.), órgãos governamentais (*e.g.* IBGE, INPE, ITC, IBAMA, secretarias etc.) e organizações não-governamentais, bem como as buscas em "sites" e portais de acesso a dados e bases espaciais na INTERNET. Também foram utilizadas ferramentas de busca existentes no Portal de Periódicos da CAPES, incluindo os Bancos de Teses e Dissertações; no Google Acadêmico; bem como em outras bases bibliográficas relacionadas tais como ISI; CSA, ScienceDirect; CrossRef; Wilson Web; Scopus.

A etapa seguinte deste estudo consistiu nas atividades de campo e nos procedimentos de mapeamento realizadas no sentido de inventariar a ocorrência de *L. caissara* e as características descritoras do ambiente.

6.5.2. DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE ENTIDADES BIOLÓGICAS E DA HIERARQUIA DE MANCHAS

6.5.2.1. Definição das classes de entidades biológicas

Dentro deste capítulo, as classes de entidades biológicas que são objeto de estudo representam diferentes expressões espaciais das entidades espécie e população.

Primeiramente cumpre lembrar que neste estudo o delineamento destas entidades espaciais correspondentes baseia-se nos resultados de modelagem de distribuição em abordagem correlativa. Em essência, este tipo de modelagem consiste em operar um algoritmo que em um primeiro passo extrai informação de associações entre registros de ocorrência e um conjunto de dados ambientais, para em um segundo passo mapear áreas onde a presença do elemento alvo seja prevista.

Existe grande debate sobre o que conceitualmente corresponderia aos resultados deste tipo de modelagem, sendo que as opiniões divergem em torno das concepções de hábitat (KEARNEY, 2006); nicho fundamental (SOBERÓN e PETERSON, 2005); nicho realizado (AUSTIN *et al*., 1990; GUISAN e ZIMMERMANN, 2000; PEARSON e DAWSON, 2003; ARAÚJO e PEARSON, 2005) ou zona adaptativa (CERQUEIRA, *in prep*.). Para discussões mais detalhadas sobre as relações entre nicho e distribuição de

espécies ver também Pulliam (2000), Guisan e Thuiller (2005), Araújo e Guisan (2006) e sobretudo Soberón (no prelo).

Em consonância com a recente proposição de Kearney (2006), neste estudo asume-se que o resultado da modelagem correlativa aqui realizada corresponderia ao hábitat, que foi adotado como conceito operacional, sendo apresentado abaixo com base na definição provida por este autor.

Hábitat: uma descrição de um espaço físico, em uma escala espaço-temporal particular, onde real ou potencialmente um organismo vive.

Um segundo conceito fundamental que foi empregado neste estudo consistiu na proposição de *eco-campo*, desenvolvida primariamente por Farina (FARINA e BELGRANO, 2004; 2006; FARINA, 2006; no prelo; FARINA *et al*., 2005; FARINA *et al*.; *in prep*.). Em função desta abordagem ser bastante recente e ainda pouco conhecida apresenta-se um quadro geral de suas principais concepções.

O termo *eco-campo* é a contração das palavras "campo ecológico" e significa o espaço físico e as características abióticas e bióticas que são percebidas por uma espécie quando um trato funcional está ativo (FARINA e BELGRANO, 2004; 2006). O eco-campo tem sido considerado como um espaço ecológico, ou carreador de significado, no qual cada função vital interage semioticamente com o mundo circundante (FARINA e BELGRANO, 2006; FARINA, 2006; no prelo). Neste espaço dinâmico de interferência dentro do mundo físico, funções internas do organismo e processos externos a este interagem ativamente como uma entidade complexa, na qual se alternam elementos hostis e favoráveis (FARINA *et al*., 2005; FARINA *et al*., *in prep*.). De acordo com Farina e Belgrano (2004) o eco-

campo pode ser considerado o espaço de interferência no qual estão ativos os mecanismos para coletar, concentrar, estocar, preservar e manipular energia. Alinhado com uma visão semiótica de paisagem cognitiva, o conceito de eco-campo é estritamente conectado com aquele de universo particular ou subjetivo, o "Umwelt" do zoólogo von Uexkull (1940). Esta proposição de eco-campo (FARINA e BELGRANO, 2004) apresenta as seguintes assunções:

- Uma espécie percebe características do ambiente em diferentes escalas de acordo com cada trato funcional que esteja em ação.
- Atributos ambientais são percebidos e reconhecidos de acordo com a função que esteja ativa em um dado momento e cada função corresponde à criação de uma paisagem cognitiva como uma integração de eco-campos componentes.
- A adaptação da espécie é o resultado de diferentes mecanismos atuando em distintos níveis de cada eco-campo.
- A favorabilidade ambiental é o resultado da combinação de diferentes eco-campos componentes.
- As prioridades de obtenção de energia e a intergração com outros mecanismos de sobrevivência permitem uma contínua mudança de um eco-campo para outro.
- Extinção local, adaptação e deslocamento geográfico (para organismos móveis) são determinados pela combinação da favorabilidade emergente dos diferentes eco-campos componentes, como um caso especial da Lei do Mínimo de Liebig.
- A variabilidade de uma espécie está sob a pressão da favorabilidade de cada eco-campo componente.

- A paisagem é a dimensão cognitiva da complexidade ecológica na qual padrões e processos estão distribuídos no espaço (cognitivo) geográfico.

Dentro destes contextos de hábitat e de eco-campo, uma vez que este estudo dirige-se à investigação da distribuição geográfica de espécie e populações, as entidades que utilizaremos serão as expressões destes sistemas projetadas no espaço geográfico das diferentes escalas definidas, para as quais adotamos os seguintes termos e definições:

Eco-campo de indivíduo: a menor unidade do hábitat no espaço geográfico, ou seja, uma mancha de hábitat que poderia ser ocupada por qualquer indivíduo da espécie alvo caso não existissem as restrições de movimento.

Eco-campo de população: agregação de eco-campos de indivíduo de acordo com as restrições de movimento cotidiano, ou seja, uma rede de manchas de hábitat e de manchas vizinhas de ambiente inóspito, mas que em conjunto situam-se dentro dos limites da capacidade de dispersão cotidiana dos indivíduos.

Eco-campo de redes de populações ou meta-população: agregação de eco-campos de população de acordo com as restrições de movimento ocasional, ou seja, uma rede de manchas de populações que em conjunto situam-se dentro dos limites da capacidade ocasional de dispersão dos indivíduos.

Eco-campo de espécie: agregação de eco-campos de metapopulação, ou seja, uma rede congregando todas as manchas de populações e metapopulações da espécie.

A partir destas definições das entidades de interesse, segue-se que o escopo deste capítulo focaliza a distribuição geográfica de *L. caissara* no Domínio da Mata Atlântica, tomando como objeto de estudo as entidades biológicas representadas pelos eco-campos de indivíduo até o eco-campo da espécie *in toto*.

Em uma abordagem escalar ascendente ("bottom-up"), partiremos dos eco-campos de indivíduo, definidos na escala de maior detalhe, para em seguida alcançar os eco-campos de população, de metapopulação e da espécie, através de procedimentos de agregação.

As entidades biológicas de maior detalhe, os eco-campos de indivíduo, são delimitadas a partir da agregação de pixels rotulados como hábitat pela modelagem correlativa, agregações estas que foram efetuadas por procedimentos com operadores de vizinhança. O pixel, que constitui o menor elemento de uma imagem matricial classificada, consiste na unidade que representa o maior nível de detalhe do conjunto de dados espacializado. Não obstante, como já destacado no capítulo 4, o pixel em si não apresenta significado biológico e torna-se necessário delimitar entidades de semântica biótica para que estas possam atuar como unidades operacionais significantes na passagem de escalas.

6.5.2.2. Desenho da hierarquia de manchas

Do mesmo modo que no capítulo 4, para desenvolver o arcabouço metodológico-operacional deste capítulo tomou-se como base teórico-conceitual a Dinâmica Hierárquica de Manchas, implementada através da estratégia de modelagem em múltiplas escalas, ou seja, a abordagem de "escada escalar" proposta em Wu (1999) e Wu e Davis (2002). A estratégia é composta de três etapas: (1) identificar a hierarquia de manchas adequada; (2) fazer observações e desenvolver modelos em níveis focais e (3) extrapolar informação de

forma hierárquica através dos diferentes domínios escalares. Entendida como a parametrização de nossa janela de percepção da realidade, escala é aqui definida como o período de tempo e espaço sobre o qual sinais são integrados para dar uma mensagem (ALLEN e STARR, 1982), podendo ser caracterizada em termos de seu grão e extensão. Para operacionalizar o desenvolvimento desta metodologia empregou-se ambiente georreferenciado, onde Sistemas Geográficos de Informação foram utilizados para integrar diversas ferramentas de análise e modelagem.

Conforme recomendações da literatura (O'NEILL *et al*.,1986; BURNETT e BLASHKE, 2003), a arquitetura desenhada para a hierarquia de manchas foi definida em três níveis, que foram utilizados como "escada escalar" para o trânsito de dados e informação entre os domínios de escala e para o desenvolvimento e aplicação de modelos nos níveis focais.

Seguindo estas diretrizes, a arquitetura projetada para servir de arcabouço multiescalar hierárquico para o estudo de caso da distribuição do mico-leão-da-cara-preta, (*L. caissara*), apresentou a configuração descrita no tabela abaixo (tab. 6.2).

Tabela 6.2. Arquitetura de níveis para o estudo da distribuição de *L. caissara* no Domínio da Mata Atlântica.

Nível hierárquico	***Nível de organização biológica***	***Escala espacial e de gestão***
Nível + 1	Eco-campo de espécie	extensão – paisagem global macrorregional/bioma/continental grão - 500m a 1km
Nível 0	Eco-campo de redes de população e metapopulação	extensão – paisagem regional grão - 30 a 90m
Nível – 1	Eco-campo de indivíduo e de população	extensão - paisagem local grão - 1 a 30m

Definidas as entidades que constituem objeto de estudo e a respectiva arquitetura hierarquia de níveis, segue-se para as etapas de modelagem correlativa de distribuição, iniciando pela fase de obtenção dos registros de ocorrência da espécie alvo e das variáveis descritoras do ambiente.

6.5.3. LEVANTAMENTO DA OCORRÊNCIA DE *LEONTOPITHECUS CAISSARA*

O inventário da ocorrência do mico-leão-da-cara-preta compreende três grupos de procedimentos: um programa de entrevista com moradores locais, um inventário de campo apoiado na técnica de "playback" das vocalizações dos micos, bem como um levantamento de registros de ocorrência da espécie obtidos antes desta pesquisa.

6.5.3.1. Programa de entrevistas

O programa de entrevistas representou a primeira etapa do levantamento da ocorrência de *L. caissara* e teve como população alvo a parcela dos habitantes que possuía bom conhecimento sobre a fauna local. Para tanto, o princípio das atividades deu ênfase especial aos moradores com mais de 20 anos de residência, que indicaram novos entrevistados potenciais, seguindo a técnica denominada “bola de neve” (GALTUNG, 1966; QUINTANA *et al.*, 1992). Precedendo a implantação definitiva do programa de entrevistas, uma fase de planejamento e adequação possibilitou assimilar as peculiaridades idiomáticas locais (vocabulário, sotaque), bem como escolher o elenco de espécies retratadas na entrevista e as melhores formas de abordagem e captura de informações, desenvolvendo então um roteiro para ser seguido sistematicamente. Embora padronizadas, todas as entrevistas foram efetuadas no contexto de uma conversa informal, onde evitamos

induzir as respostas e empregamos um vocabulário de baixa complexidade e pleno de expressões locais, procurando formular perguntas simples a fim de maximizar a quantidade de informações obtidas e minimizar a dificuldade de resposta por parte dos entrevistados (CANNEL *et al.*, 1977; FILION, 1976; QUINTANA *et al.*, 1992). As entrevistas eram realizadas por duas pessoas que se dividiam nas funções de conduzir a conversa e registrar as informações por escrito e em microcassete, evitando-se assim quebras de seqüência e perda de informações (fig. 6.3). Seguindo o roteiro, após delimitar o interesse em torno dos primatas, para o que era necessário abordar o grupo de mamíferos arborícolas, procurava-se obter descrições livres das espécies conhecidas pelo entrevistado e uma lista daquelas já visualizadas na região. Com o intuito de confirmar as identificações e testar a confiabilidade das respostas apresentava-se uma seqüência de ilustrações que incluía além dos primatas locais outras espécies exóticas para a região. Além de *Leontopithecus caissara* (mico-leão-da-cara-preta), entre os animais figurados constavam: (1) espécies ocorrentes na região, tais como *Sciurus aestuans* (serelepe), *Sphiggurus* spp. (ouriço-caxeiro), *Kannabateomys amblyonyx* (rato-da-taquara), *Nasua nasua* (quati) e os dois primatas *Cebus apella* (macaco-prego) e *Alouatta clamitans* (bugio-ruivo, barbado); (2) primatas com diminuta possibilidade de ocorrência, como *Brachyteles arachnoides* (mono-carvoeiro) e *Callicebus personatus* (sauá); (3) primatas exóticos para a região, como *Ateles belzebuth* (macaco-aranha), *Saguinus midas* (sauim); (4) primatas exóticos para a região, mas que poderiam ocorrer localmente devido a eventual introdução, como *Callithrix jacchus* (sagüi de tufos brancos) e *Callithrix penicillata* (sagüi de tufos negros).

Baseado na porcentagem de acerto na identificação positiva ou negativa dos elementos do roteiro, um grau de confiabilidade que variou entre baixo (< 35 %), médio (≥

35 < 75 %) e alto (≥ 75 %) foi atribuído às respostas de cada entrevistado, sendo eliminadas aquelas associadas ao grau baixo.

Figura 6.3. Realização de entrevista com moradores locais da Ilha do Cardoso.

As respostas referentes à ocorrência de *L. caissara* foram localizadas em mapas de escala 1:50.000, onde cada resposta é equivalente a uma área de 1 km^2. Para proposta de análise, caracterizamos como respostas positivas aquelas em que a identidade de *L.caissara* foi plenamente estabelecida pelo entrevistado, através de descrição e reconhecimento em ilustrações. Cabe destacar que respostas são elementos descritores de áreas e podem conter mais de um registro positivo, aqui entendido como uma informação pontual de ocorrência, localizável em mapas de escala 1:50.000. No caso de respostas negativas, levamos em conta apenas aquelas em que o entrevistado apresentasse um conhecimento mínimo da localidade da resposta, avaliado pela freqüência de incursões às matas, conjugada ao tempo de residência no local. Desse modo, consideramos como respostas negativas somente as

oriundas das seguintes combinações: freqüência alta (incursões diárias a semanais) com um mínimo de seis meses de residência no local; freqüência média (incursões mensais a trimestrais) com residência mínima de três anos e freqüência baixa (incursões semestrais a anuais) com no mínimo 10 anos de residência.

Cabe ainda mencionar que durante as atividades do programa de entrevistas procuramos recolher todo o material referente a *L. caissara* (peles, material osteológico, fotografias etc.) encontrado na posse de habitantes locais, bem como recuperar sua precisa procedência junto aos proprietários e/ou coletores originais.

Os resultados obtidos no programa de entrevistas foram utilizados para construir planos de informação digitais sobre a ocorrência de *L. caissara*, que participaram das análises em geoprocessamento.

6.5.3.2. Inventário de campo da presença de *L. caissara* com o uso de "playback" de vocalizações

Inventários de populações de primatas nos quais entrevistas com a população local são conjugadas a censos auxiliados por "playback" de vocalizações têm apresentado bons resultados, sobretudo para Callithrichidae (DIEGO *et al.*, 1993; KIERULFF, 1993; MENDES, 1993; PINTO, 1994; PINTO e TAVARES, 1994). Seguindo esta orientação, a segunda etapa do estudo consistiu na investigação das áreas com auxílio de "playback" de vocalizações longas para a confirmação da presença da espécie nas zonas de entrevistas positivas e em uma faixa tampão adjacente incluída na zona de respostas exclusivamente negativas. Os procedimentos utilizados nos censos seguiram basicamente o método desenvolvido para *L. rosalia* (KIERULFF, 1993), que consiste na reprodução das

vocalizações territoriais dos micos-leões, as chamadas longas ("long calls"), simulando um encontro entre grupos para induzir uma resposta e aproximação dos grupos selvagens presentes na área de alcance da emissão (PERES, 1986, 1991; KLEIMAN *et al.*, 1988).

Segundo PINTO (1994) vocalizações de *L. rosalia* podem ser utilizadas para atrair grupos de outras espécies de *Leontopithecus*, o que foi demonstrado com sucesso para *L. chrysomelas*. Embora de fato as vocalizações empregadas pertencessem a *L. rosalia*, nossos procedimentos com "playback" induziram respostas afirmativas em *L. caissara*, conforme atestou o experimento controlado que realizamos na Ilha de Superagui, onde respostas positivas foram obtidas até cerca de 170 m da fonte emissora. As reproduções foram executadas através de um gravador MSX, ligado a um pré-amplificador de 9 V e este a um sistema quádruplo de autofalantes do tipo "twitter", sustentados por um cabo telescópico. Com este equipamento foi possível otimizar a emissão das chamadas longas devido às seguintes características do sistema: 1) o gravador MSX é construído especialmente para enviar sinais de alta freqüência para computadores e possui um sistema de cabeçote que permite um ajuste da fita cassete, diminuindo as distorções provocadas pelos sons agudos; 2) o pré-amplificador acoplado ao sistema de "twitters" permitiu um aumento da potência de emissão sem distorsões; 3) a disposição quadridirecional dos "twitters" permitiu que a área de ação do "playback" fosse atingida simultaneamente, evitando saturação de chamadas; 4) a emissão a partir de posição elevada oferece maior similaridade com a situação real além de melhorar a propagação do som. A melhoria de desempenho proporcionada por este equipamento aumentou o raio de alcance da emissão de 100 m, como o empregado por KIERULFF (1993), para 150 m. Nos testes realizados em campo verificou-se que o alcance da emissão do "playback" atingia uma área de raio maior do que 150 m, contudo, além desta distância havia uma diminuição da eficácia na indução de

resposta. O método demonstrou ser efetivo para cobrir a área dentro do raio de 150 m, embora tenha sido observado que na zona periférica deste círculo havia uma pequena melhoria nos resultados a partir do limite de 150 m até chegar a 125 m. Assim sendo, com o intuito de otimizar a cobertura da área censada, os pontos de emissão de "playback" foram dispostos de maneira que houvesse uma superposição na faixa de 25 m situada na periferia do círculo de alcance da emissão (fig. 6.4). Deste modo, emissões de "playback" foram executadas a cada 250 m, em transectos paralelos orientados por bússola, que em um sistema de varredura cobriram a totalidade de cada área amostral investigada (cerca de 200 ha), permitindo a detecção integral dos grupos existentes (fig. 6.4). Em cada ponto eram reproduzidas as chamadas longas ("long calls") de machos e fêmeas, em três séries de emissões espaçadas de 4 em 4 minutos.

Os blocos amostrais de aproximadamente 200 ha foram dispostos segundo uma amostragem aleatória estratificada dentro da área definida a partir do resultado das entrevistas. Este tamanho de 200 ha para a unidade amostral do inventário foi definido com base no maior "home range" (espaço vital) anteriormente conhecido para *Leontopithecus* (VALLADARES-PÁDUA, 1993), de modo a minimizar a possibilidade de não detectar grupos de micos existentes no local. Consideramos como amostras negativas apenas aquelas áreas onde a varredura de dois blocos amostrais contíguos, totalizando aproximadamente 400 ha, não indicou qualquer indício da presença de *L. caissara*. Todas as amostras e a posição de cada grupo registrado foram posteriormente associadas a coordenadas quilométricas (UTM, Sistema Universal Transversal de Mercator) com base em cartas topográficas em escala 1:50.000.

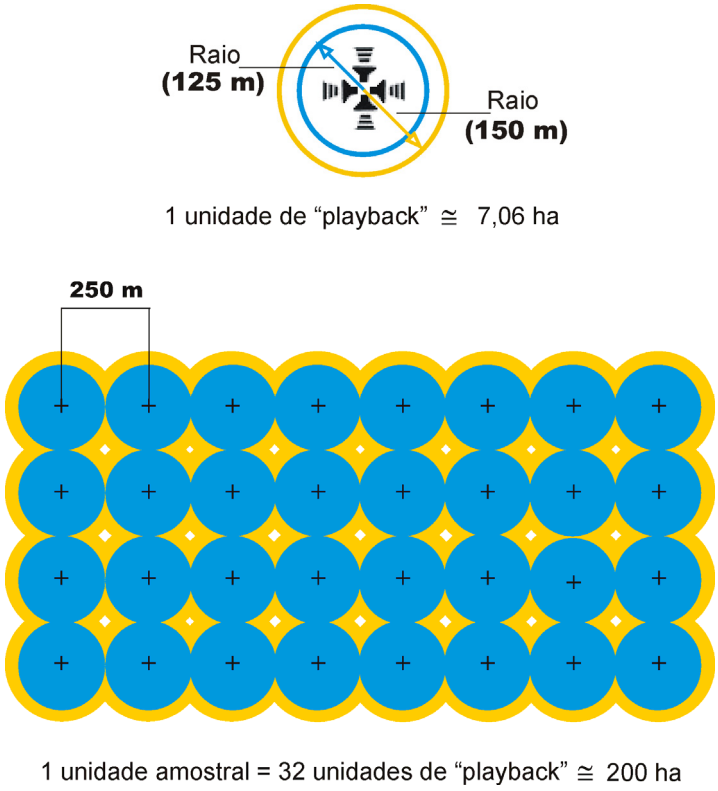


Figura 6.4. Representação esquemática do alcance da emissão do “playback” das vocalizações mostrando a área coberta por uma estação ou unidade amostral do censo de “playback”, que atinge um raio de 150 m. A figura mostra também a área coberta em um bloco ou unidade amostral do inventário, que consiste de 32 unidades de “playback" dispostas com eqüidistância de 250 m, com superposição da faixa periférica do círculo alcançado pela emissão.

Em parte das atividades de campo do levantamento da ocorrência de *L. caissara*, a posição geográfica dos pontos foi obtida com apoio do Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Os resultados obtidos no inventário de campo com auxílio de “playback” das vocalizações de micos serviram de base para elaborar planos de informação sobre a cobertura deste levantamento e sobre a ocorrência de *L. caissara*. No mapa de registros de

"playback", os mesmos são representados com um buffer de 125m, correspondendo à área de alcance da emissão da chamada. Derivados deste inventário com "playback" foram empregados nas etapas da modelagem de distribuição da espécie.

6.5.3.3. Levantamento de registros de ocorrência de *L. caissara* obtidos em estudos prévios

Foram reunidos os registros de ocorrência de *L. caissara* que satisfizeram o critério de posicionamento preciso em escala 1:50.000, oriundos de localizações visuais, auditivas e procedências fidedignas de espécimens e de fotografias. Além de alguns poucos encontros ocasionais, os registros procedem de um censo prévio que utilizou o método clássico de transecto linear (PERSSON e LORINI, 1993; LORINI e PERSSON, 1994).

Assim como nos inventários anteriores, os resultados reunidos por este procedimento foram transformados em plano de informação sobre a ocorrência de *L. caissara* que foram utilizados nas etapas de avaliação da modelagem de distribuição da espécie.

6.5.4. LEVANTAMENTO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Em relação aos levantamentos de características do ambiente, os procedimentos envolveram a produção de mapeamentos baseados em fontes secundárias e em sensoriamento remoto.

Os descritores do ambiente compreenderam quatro grupos de mapeamentos: os climáticos, os morfo-geológicos, os bióticos e os antrópicos.

6.5.4.1. Climáticos

As bases climáticas foram obtidas a partir dos dados Worldclim (ver HIJMANS *et al*., 2005 para descrição detalhada), mais particularmente do conjunto de dados bioclimáticos, que são derivados dos valores de temperatura e precipitação mensais, com o intuito de gerar variáveis de maior significado biológico. As 19 variáveis bioclimáticas, que representam tendências anuais, sazonalidade e fatores ambientais extremos ou limitantes, são abaixo relacionadas.

bio1) temperatura média anual

bio2) amplitude média diária da temperatura (média mensal (temp. máx. - temp. mín.))

bio3) isotermalidade ((bio2/bio7) x 100))

bio4) sazonalidade da temperatura (desvio padrão x 100)

bio5) temperatura máxima do mês mais quente

bio6) temperatura mínima do mês mais frio

bio7) amplitude anual da temperatura (bio5 - bio6)

bio8) temperatura média do trimestre mais úmido

bio9) temperatura média do trimestre mais seco

bio10) temperatura média do trimestre mais quente

bio11) temperatura média do trimestre mais frio

bio12) precipitação acumulada anual

bio13) precipitação do mês mais úmido

bio14) precipitação do mês mais seco

bio15) sazonalidade da precipitação (coeficiente de variação)

bio16) precipitação do trimestre mais úmido

bio17) precipitação do trimestre mais seco

bio18) precipitação do trimestre mais quente

bio19) precipitação do trimestre mais frio

6.5.4.2. Morfo-geológicos

Os descritores morfo-geológicos compreenderam os modelos digtais de elevação e os mapas geológicos. Os modelos digitais de elevação foram construídos com base em dados SRTM ("Shuttle Radar Topography Mission"), a missão espacial de topografia por radar da NASA. Executada pelo ônibus espacial Endeavour durante 11 dias em fevereiro de 2000, seu objetivo foi obter a mais completa base de dados topográfica digital de alta resolução da Terra. Os dados foram processados no Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA e são distribuídos através do United States Geological Survey com a resolução de 3", ou cerca de 90m (VALERIANO, 2004). Os modelos de elevação SRTM utilizados seguiram a metodologia de VALERIANO (2004) o que permite correções e melhoramentos compatíveis com produtos de resolução de 1", ou cerca de 30m (VALERIANO, 2005). O modelo digital de elevação em resolução de 30m foi construído com base também em aerofotografias em escala de 1:25.000 e ortofotos em escala de 1:15.000.

O mapa geológico no recorte do Domínio da Mata Atlântica foi construído com base na Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, publicada pela CPRM (2004). Já o mapeamento geológico da região entre norte de SC e sul de SP foi resultado da compatibilização dos mapeamentos geológicos do litoral norte de Santa Catarina, do litoral do Paraná e do litoral sul de São Paulo, publicados respectivamente por ANGULO e

SOUZA (2004), ANGULO (2004) e SUGUIO (1978), além de interpretação sobre imagens Landsat-7/ETM+, conforme descrito no capítulo 4.

6.5.4.3. Bióticos

Os descritores bióticos consistiram em mapeamentos de vegetação obtidos através de sensoriamento remoto a partir de produtos MODIS para o domínio da Mata Atlântica e de imagens Landsat-7/ETM+ para a região do norte de SC ao sul de SP, de acordo com os procedimentos descritos no capítulo 4.

6.5.4.4. Antrópicos

Neste grupo encontram-se os mapeamentos de áreas antrópicas, de graus de proteção das áreas e de limites administrativos estaduais e municipais.

Mapeamentos de áreas antrópicas urbanas e agropecuárias, em porções da região entre o norte de SC e sul de SP, foram obtidos através das cartas topográficas e de sensoriamento remoto. Para o ano de 1980, a base consistiu de cartas topográficas 1:50.000 do IBGE (SG.22-X-D-III-1, Serra Negra; SG.22-X-D-III-2, Ariri; SG.22-X-D-III-3, Guaraqueçaba; SG.22-X-D-III-4, Barra do Superagüi). Já para o ano de 1994 tomou-se como base a interpretação de imagens Landsat-5/TM, correspondentes a três cenas de órbita-ponto 220-78, 220-77 e 219-77, com data de passagem de 18/07/1994.

Na área do Domínio da Mata Atlântica foram mapeadas as unidades de conservação de administração federal, de acordo com os dados fornecidos pelo IBAMA (ver capítulo 4). Para porções da região norte de SC a sul de SP, as unidades de conservação de jurisdição estadual foram delimitadas segundo os dados fornecidos pelo Instituto Ambiental do Paraná

(IAP), pelo Instituto Estadual de Florestas do Estado de São Paulo (IEF) e pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SEMA). Estas últimas delimitações foram empregadas para mapear o grau de proteção das áreas.

Os limites territorias de estados e municípios foram construídos com base na malha digital do IBGE para o ano de 2002.

6.5.5. CRIAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS

Os Bancos de Dados Geográficos (BDGs) foram construídos para representar os dois recortes territoriais descritos na área de estudo, de modo a armazenar os dados relevantes para a realização das etapas do estudo proposto neste capítulo. Em cada recorte analisado os bancos de dados geográficos foram definidos com os parâmetros técnicos descritos abaixo.

6.5.5.1. Recorte 1: Domínio do bioma da Mata Atlântica

Sistema cartográfico no ambiente digital: cooordenadas geodésicas no Sistema LatLong, *datum* World Geodetic System 1984 -WGS84.

Sistema de projeção cartográfica para impressão: projeção Policônica, latitude de origem 0° e longitude de origem 54° Oeste, Elipsóide UGGI67, *datum* Planialtimétrico Sul Americano 1969 (South American Datum - SAD69).

Resolução: 30”, aproximadamente 1 km

Retângulo envolvente: Longitudes de -58.0083332 a -33.6583319 e Latitudes de -29.9833336 a -2.0666655.

Dimensões da matriz: 2922 colunas e 3350 linhas.

6.5.5.2. <u>Recorte 2</u>: Região costeira sul-sudeste (litoral norte do Estado de Santa Catarina ao litoral sul do estado de São Paulo)

6.5.5.2.1. Matriz com pixel de 30 m

Sistema cartográfico no ambiente digital: projeção Universal Transversa de Mercator, Hemisfério Sul, Zona UTM 22, latitude de origem 0° e longitude de origem 51° Oeste, *datum* SAD69.

Sistema de projeção cartográfica para impressão: idem anterior.

Resolução: 30m

Retângulo envolvente: Longitudes de 700000 a 913630 e Latitudes de 7075000 a 7330000.

Dimensões da matriz: 7121 colunas e 8500 linhas.

6.5.5.2.2. Matriz com pixel de 90 m

Sistema cartográfico no ambiente digital: projeção Universal Transversa de Mercator, Hemisfério Sul, Zona UTM 22, latitude de origem 0° e longitude de origem 51° Oeste, *datum* SAD69.

Sistema de projeção cartográfica para impressão: idem anterior.

Resolução: 90m

Retângulo envolvente: Longitudes de 710530 a 912040 e Latitudes de 7089340 a 7316590.

Dimensões da matriz: 2239 colunas e 2525 linhas.

Após a definição destes parâmetros, foram incorporados aos BDGs todos os dados referentes ao levantamento dos registros de ocorrência de *L. caissara*, bem como aqueles relativos às variáveis ambientais.

6.5.6. MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO

O processo de modelagem preditiva de espécies para fins de mapeamento de distribuição geográfica envolve cinco etapas principais de procedimentos: (1) seleção e preparação das variáveis a serem utilizadas; (2) seleção de algoritmos de modelagem; (3) modelagem preditiva do ambiente potencial para a espécie; (4) avaliação de desempenho do modelo produzido e (5) delimitação da distribuição geográfica.

A seguir são explicitados os procedimentos realizados ao longo destas etapas da modelagem de distribuição da espécie alvo, *Leontopithecus caissara*.

6.5.6.1. Seleção e preparação das variáveis

A seleção das variáveis e a sua reunião dentro do SGI constituem a etapa que mais consome tempo e recursos dentro das análises espaciais. Esta tarefa envolve compatibilizar dados de natureza distinta, tais como diferenças de formatos de armazenamento, de padrões cartográficos, de taxonomia etc. Embora a escolha das variáveis seja dirigida em grande parte pelo orçamento disponível e pelo propósito do estudo, alguns autores indicam que os descritores do ambiente utilizados para modelar relacionamentos entre espécies e hábitat deveriam ser selecionados levando em conta a resposta da espécie; a facilidade de

mensuração ou estimação; a viabilidade para predições em condições futuras e a utilidade para a efetivação de planos e decisões de manejo (SCHAMBERGER e O'NEIL, 1986). A utilidade de um modelo para o manejo de biodiversidade depende tanto de sua acurácia biológica quanto de sua imediata aplicabilidade, entendidos respectivamente como a capacidade do modelo em representar o fenômeno biológico de interesse e a facilidade com que este modelo pode ser utilizado.

Tendo em vista os aspectos acima expostos, os procedimentos de inventários e mapeamentos deste estudo perseguem uma combinação adequada de variáveis acessíveis e pertinentes ao fenômeno analisado. Os descritores ambientais escolhidos baseiam-se em diretrizes amplamente conhecidas de que o relevo, o clima, a estrutura de vegetação e as atividades do homem são fatores que exercem influência sobre a favorabilidade do hábitat de uma espécie e, em conseqüência, também sobre a sua distribuição. Os elementos da geosfera (relevo, substrato, drenagem etc.) constituem o arcabouço físico dos geossistemas onde estão inseridos os elementos bióticos da flora e da fauna, sistemas estes submetidos à ação de fatores climáticos. Os elementos do clima (*e.g*. precipitação e temperatura) representam condicionantes em termos fisiológicos que incidem diretamente sobre o elemento alvo, sendo que mesmo quando não constituem uma influência direta para a fisiologia de uma espécie da fauna, representam importantes recursos para a flora. A estrutura da vegetação é principalmente uma expressão de elementos climáticos, havendo inúmeros trabalhos clássicos que dão exemplos do papel da temperatura e da pluviosidade na regulação da distribuição de plantas (HOLDRIDGE, 1967; MacARTHUR, 1972; entre outros). Por outro lado, os elementos climáticos podem aumentar a chance de sobrevivência e reprodução de um animal quando o mesmo está exposto a diferentes amplitudes de condições ambientais, dentro do espectro de tolerância fisiológica da espécie

(ANDREWARTHA, 1970; ELTON, 1962). Também como fontes de alimento e de abrigo, os distintos tipos de vegetação podem representar recursos universais para as espécies heterótrofas, sendo que a variação em qualidade e quantidade destes recursos também afeta a chance do animal de sobreviver e reproduzir. Finalmente, as atividades antrópicas têm que ser adicionadas ao quadro ambiental para completar estes conjuntos de interações ecológicas, uma vez que o homem normalmente muda a favorabilidade de um hábitat para seu próprio benefício. Neste sentido, o elenco de características descritoras do hábitat escolhido para este estudo conjuga variáveis de quatro grupos fundamentais: as morfo-geológicas, as climáticas, as bióticas e as antrópicas. Estes quatro grupos representam sobretudo variáveis cenopoéticas e descritores de acessibilidade. As variáveis dentro de cada grupo estão abaixo relacionadas:

Morfo-geológicas: mapa geológico, modelo digital de elevação.

Climáticas: variáveis bioclimáticas representando tendências anuais e sazonais (temperatura média anual; amplitude média diária da temperatura; amplitude anual da temperatura; precipitação acumulada anual; sazonalidade da temperatura; sazonalidade da precipitação) e fatores ambientais extremos ou limitantes (temperatura máxima do mês mais quente; temperatura mínima do mês mais frio; precipitação do mês mais úmido; precipitação do mês mais seco; temperatura média do trimestre mais quente; temperatura média do trimestre mais frio; temperatura média do trimestre mais úmido; temperatura média do trimestre mais seco; precipitação do trimestre mais úmido; precipitação do trimestre mais seco; precipitação do trimestre mais quente; precipitação do trimestre mais frio).

Bióticas e antrópicas: mapa de cobertura do solo

As variáveis de ocorrência consistiram nos resultados dos levantamentos de campo anteriormente descritos, sendo utilizadas como conjuntos independentes de treinamento e de teste conforme abaixo discriminado.

Ocorrências para treinamento: registros positivos derivados do inventário com "playback"

Ocorrências para teste: registros positivos derivados de estudos prévios

Ausências: pontos dentro das áreas com resultado negativo no inventário com "playback"

Para evitar problemas derivados da autocorrelação espacial das amostras da variável dependente, os pontos de presença e ausência foram obtidos a partir de amostragem aleatória dentro das áreas positivas e negativas, de forma a gerar um conjunto de dados que pudesse satisfazer os requerimentos de independência amostral. Esta condição foi avaliada e atingida com base na análise de autocorrelação espacial, derivada do cálculo do coeficiente I de Moran, um índice que varia de -1 a +1, indicando respectivamente, que as amostras são muito dissimilares ou muito similares, sendo que valores ao redor de 0 indicariam ausência de correlação espacial. A análise foi efetuada empregando o critério de vizinhança do tipo torre ("RooksCase") através dos módulos de estatística espacial do pacote Idrisi Kilimanjaro.

6.5.6.2. Seleção dos algoritmos de modelagem

Antes de apresentar os algoritmos selecionados para a avaliação de desempenho, apresenta-se um quadro geral dos métodos utilizados em modelagem de distribuição.

6.5.6.3. Breve panorama dos modelos de distribuição preditiva de espécies

Para GUISAN e ZIMMERMANN (2000) os modelos matemáticos aplicados à ecologia podem ser agrupados em três conjuntos, segundo a direção de seu enfoque sobre generalidade, realidade e precisão, sendo que em cada grupo dois destes aspectos são priorizados a expensas do terceiro. O primeiro grupamento focaliza sobre a generalidade e a precisão, consistindo nos chamados modelos analíticos, que são desenvolvidos para prever um cenário de modo acurado, mas dentro de uma realidade simplificada e limitada (*e.g.* equações de crescimento populacional logístico). No segundo grupo estão os modelos conhecidos como mecanicistas, fisiológicos, causais ou de processos, que derivam suas previsões de relações reais de causa e efeito, sendo desenvolvidos com o intuito de serem realistas e generalistas. Esta generalidade deriva da assunção de que estes relacionamentos podem ser considerados funcionais do ponto de vista biológico. Dentro do terceiro grupo encontram-se os modelos denominados empíricos, estatísticos ou fenomenológicos, que sacrificam a generalidade em favor da precisão e realidade, categoria em que via de regra encaixam-se os modelos de distribuição de espécies.

De uma maneira geral, os estudos que envolvem modelagem de distribuição de espécie apresentam três componentes fundamentais: (1) um conjunto de dados descrevendo a incidência ou abundância de espécies e outro contendo as variáveis explicativas; (2) um modelo matemático que relaciona a espécie com as variáveis explicativas; (3) a avaliação da utilidade do modelo através de validação ou por modelos de robustez (RUSHTON *et al*., 2004; GUISAN e ZIMMERMANN, 2000).

Atualmente existe uma grande variedade de técnicas de modelagem para explorar a relação entre os dados sobre a ocorrência de espécies e as variáveis ambientais preditivas, sendo que as metodologias utilizadas podem ser relacionadas de várias maneiras distintas.

Em um primeiro agrupamento, estes métodos de distribuição podem ser divididos em dois tipos, o dos modelos estatísticos e o dos modelos baseados em regras. No primeiro caso encaixam-se os seguintes métodos: regressões múltiplas (MR: "Multiple Regression") (GUISAN e ZIMMERMANN, 2000); modelos lineares generalizados (GLM: "Generalized Linear Models") (AUSTIN *et al*., 1994); modelos lineares aditivos (GAM: "Generalized Additive Models"*)* (YEE e MITCHELL, 1991); análise por árvores de classificação (CTA: "Classification Tree Analysis"*)* (BREIMAN *et al*., 1984); máquinas de vetores suporte ("Support Vector Machines - SVM") (GUO *et al*., 2005); modelos de máxima entropia (PHILLIPS *et al*., 2006). Dentre os modelos baseados em regras (NIX, 1986) encontram-se os algoritmos genéticos (GA: "Genetic Algoritm") tais como o GARP: "Genetic Algorithm for Rule Set Production" (STOCKWELL, 1999; STOCKWELL e NOBLE, 1992; STOCKWELL e PETERS, 1999), bem como as redes neurais artificiais (ANN: "Artificial Neural Networks") (OLDEN e JACKSON, 2002; PEARSON *et al*., 2002).

Já Elith *et al*. (2006), com base nos tipos de dados que alimentam os modelos, classificam os métodos de modelagem de distribuição em dois grandes grupos: (1) os que utilizam apenas registros de presença, tais como os envelopes bioclimáticos e (2) os que empregam dados de presença e ausência (ou pseudo-ausência) da espécie alvo, de modo a limitar as áreas de ocorrência e diminuir erros de falsos positivos. Este segundo conjunto pode ser dividido em dois subgrupos: (a) os que utilizam dados de uma espécie apenas e (b) aqueles que descrevem a presença da espécie alvo através de dados de presença de outras espécies, isto é, da comunidade.

6.5.6.3.1. Métodos de envelopes bioclimáticos

Os modelos de envelopes ambientais predizem locais com condições favoráveis para uma espécie, com base no cálculo de um envelope retilíneo mínimo no espaço multidimensional de variáveis ambientais. Como muitas vezes este espaço constitui-se apenas de variáveis climáticas, tais modelos freqüentemente recebem a denominação de envelopes bioclimáticos. Estes métodos simples consistem na delimitação de um envelope de superfície de amplitude, definido pela identificação de valores máximos e mínimos para cada variável de entrada, a partir do conjunto de presenças observadas do elemento alvo. A este grupo pertencem os modelos BIOCLIM (BUSBY,1991) e DOMAIN (CARPENTER *et al*., 1993).

6.5.6.3.2. Métodos que utilizam dados de presença e supõem ausência

Este segundo conjunto de modelos pode ser dividido em dois subgrupos: (a) os que utilizam dados de uma espécie apenas e (b) aqueles que descrevem a presença da espécie alvo através de dados de presença de outras espécies, isto é, da comunidade.

Os tipos de modelos que tratam de uma só espécie efetuam a previsão da ocorrência com base nos dados sobre a sua presença, nas variáveis ambientais explicativas e em diferentes técnicas de regressão (BROTONS *et al*., 2004). A esta categoria pertence grande parte dos modelos atualmente utilizados, tais como algoritmos genéticos (GA); modelo linear aditivo (GAM) e modelo linear generalizado (GLM) (THUILLER, 2003); modelos generalizados de boosting (GBM) ou "Boosted decision tree" (BRT) (FRIEDMAN, 2001; THUILLER *et al*., 2006); "randomForest" (RF) (BREIMAN, 2001; THUILLER *et al*., 2006); árvores aditivas múltiplas (MART - "Multiple Additive Trees"), modelo de

dissimilaridade generalizado para apenas uma espécie (GDM-SS); análise discriminante linear clássica (LDA); análise discriminante de mistura (MDA – "Mixture Discriminant Analysis") (HASTIE *et al*., 1994; THUILLER *et al*., 2006); análise fatorial de nicho ecológico (ENFA - "Ecological Niche Factor Analysis") (HIRZEL *et al*., 2002); redes neurais artificias (ANN); máquinas de vetores suporte ("Support Vector Machines - SVM") (GUO *et al*., 2005) e máxima entropia (Maxent) (PHILLIPS *et al*., 2006).

No grupo dos modelos que tratam com a presença de outras espécies da comunidade para efetuar a predição de ocorrência da espécie alvo encontram-se os modelos generalizados de dissimilaridade ("Generalised Dissimilarity Model, GDM") e a abordagem de regressão adaptativa multivariada para comunidades ("Multivariate Adaptative Regression Splines for Communities, MARS-COMM") (FRIEDMAN, 1991; ELITH *et al*., 2006).

6.5.6.4. Algoritmos selecionados para avaliação de desempenho

Dentre estes diversos modelos disponíveis acima destacados, neste estudo foram empregados quatro algoritmos para a avaliação de desempenho, com vistas a escolher a melhor alternativa para a realização da modelagem definitiva. No conjunto escolhido estão representados dois algoritmos que trabalham apenas com presenças, do tipo envelope climático (Bioclim e Domain), bem como dois modelos que utilizam dados de presença e supõem ausência (Análise Discriminante Linear e Máxima Entropia).

Os dois primeiros representam respectivamente um algoritmo de envelope simples, (Bioclim) e outro que utiliza a métrica de distância de Gower (Domain). Já os dois últimos algoritmos representam modelos estatísticos que adotam duas abordagens distintas, sendo o

primeiro um algoritmo baseado em estatística clássica linear e freqüentista (Algoritmo Discriminante de Fisher), enquanto o segundo consiste em um algoritmo de aprendizado de máquina baseado em estatística bayesiana (Maxent).

6.5.6.4.1. Bioclim

A partir da operação deste algoritmo, todas as áreas situadas dentro da caixa delineada pelos limiares de valores máximos e mínimos, estabelecidos pelos pontos encontrados no conjunto de dados, serão incluídas como positivas no modelo de distribuição resultante (ver BUSBY, 1991 para maiores explicações). Esta caixa delimitada constitui o envelope ambiental do elemento alvo.

6.5.6.4.2. Domain

Este modelo gera mapas de similaridade ou distância, com base na métrica de Gower, considerando que para cada célula do mapa matricial da área sendo modelada, os valores encontrados correspondentes às variáveis preditoras definem uma coordenada ambiental. A métrica de Gower constitui um modo de computar a distância entre qualquer par de tais coordenadas ambientais.

O procedimento do algoritmo Domain consiste em calcular a distância estatística de Gower entre cada célula do mapa e cada ponto de presença, utilizando as váriaveis explicativas. Para uma única variável preditora (k), a distância entre o ponto de ocorrência A e a célula B do mapa matricial é calculada pela diferença absoluta entre os valores da variável nestas duas posições, dividida pela amplitude (“range”) da variável ao longo de

todos os pontos. A distância de Gower consiste na média sobre todas as variáveis explicativas, segundo a fórmula abaixo.

$$d_{AB} = \frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p}\frac{|A_k - B_k|}{range(k)}$$

A estatística de similaridade é calculada pela expressão $\boldsymbol{D = 1 - d_{AB}}$.

O algoritmo Domain cria um novo mapa e rotula cada célula desta nova matriz com o valor da distância de Gower entre cada célula e o ponto de ocorrência mais próximo encontrado no conjunto de treinamento. Assim o modelo final mapeia como positivas as regiões que são mais similares às áreas de ocorrência conhecida do elemento alvo. Maiores detalhes do modelo Domain podem ser encontrados em Carpenter *et al*. (1993)

6.5.6.4.3. Algoritmo discriminante de Fisher

O algoritmo LDA de Fisher efetua uma análise linear discriminante sobre os dados das amostras de treinamento (presenças, ausências) com o objetivo de formar um conjunto de funções lineares que expressam o grau de suporte para a designação de cada classe envolvida. As características e operação deste algoritmo já foram descritas no capítulo 4. Explicações mais detalhadas sobre análises lineares discriminantes podem ser encontradas em Klecka (1980). Cumpre notar que esta utilização da análise estatística discrimanante provavelmente fere os requerimentos de normalidade e ausência de colinearidade em

termos das variáveis preditoras, uma vez que variáveis climáticas geralmente não reúnem estas características.

6.5.6.4.4. Maxent

A formalização da Máxima Entropia (Maxent), segundo Phillips *et al*. (2006), representa um método para realizar previsões ou inferências a partir de informações incompletas, sendo aplicado em diversas áreas tais como astronomia, reconstrução de imagens, física estatística e processamento de sinais. A abordagem de Máxima Entropia (Maxent) foi proposta por Jaynes (1957) no contexto da mecânica estatística e desde então tem sido empregada em muitas áreas das ciências da computação e da aprendizagem estatística, especialmente em processamento de linguagens naturais (BERGER *et al*., 1996).

O modelo de Máxima Entropia (Maxent) utiliza como conjuntos amostrais de entrada tanto as presenças da espécie alvo quanto as pseudo-ausências ou pontos de "background". A concepção de aplicar Maxent para modelagem de distribuição de espécies consiste em estimar a probabilidade de ocorrência do elemento alvo com vistas a encontrar a distribuição de probabilidade de máxima entropia, sujeita a um conjunto de restrições que representam a informação incompleta sobre a distribuição deste alvo. A informação disponível sobre a distribuição da espécie constitui um conjunto de valores tomados como verdades terrestres, denominadas *características*, sendo que suas restrições são os valores esperados de cada característica que devem corresponder às médias empíricas, ou seja, aos valores médios para um conjunto de pontos tomados da distribuição do alvo. Segundo Dudik *et al*. (2004) e Phillips (2006) este procedimento equivale a encontrar a distribuição

de máxima probabilidade de Gibbs, isto é, a distribuição que é exponencial em uma combinação das características.

Descrevendo uma versão não regularizada (com o valor de regularização em zero), a distribuição computada maximiza o produto da probabilidade das localidades amostrais de ocorrência, equivalendo a uma distribuição de Gibbs que toma a seguinte forma;

$$P(x) = \exp(c1 * f1(x)\ c2 * f2(x)\ c3 * f3(x) \ldots) / Z$$

Neste caso *c1, c2, ...* são constantes; *f1, f2, ...* são as características e *Z* é uma constante escalonada que assegura que *P* some 1 na totalidade das células da matriz. O algoritmo implementado neste programa garante convergência em valores de *c1, c2...*, que resultam na (única) distribuição ótima *P*.

O processo de modelagem é iterativo e inicia assumindo uma distribuição uniforme de probabilidade. À medida que cada característica e seu peso relativo são seqüencialmente atualizados, o ganho aumenta de modo exponencial nas localidades favoráveis. Assim sendo, um valor de ganho de 1,8, por exemplo, indica que a distribuição ajusta-se aos pontos das amostras de treinamento cerca de seis vezes [= exp (1,8)] melhor do que uma distribuição ao acaso. O ganho aumenta a cada iteração até que a mudança de uma iteração para a próxima fique abaixo do limiar de convergência, ou até que o número máximo de iterações tenha sido executado. Neste dado momento a distribuição é escolhida, sendo que esta é a que apresenta a mais alta entropia e ao mesmo tempo reúne os critérios de restrição conhecidos.

No modelo Maxent são disponíveis seis diferentes características, algumas expressam o estado de variáveis únicas e outras as interações entre variáveis. O efeito

destas características faz com que a distribuição de probabilidade de saída seja forçada a permanecer estruturalmente idêntica, em termos de estatística, à distribuição dos valores ambientais médios tomados nos registros de ocorrência de entrada. Para relaxar esta restrição pode ser recomendado utilizar a opção de *regularização*, uma ferramenta que reduz o ganho iterativo e auxilia a evitar o sobreajuste ("overfitting") do modelo, sobretudo se poucos registros de ocorrência são disponíveis. Aplicar um valor maior de regularização leva a uma distribuição predita mais ampla.

O resultado primário do algoritmo assinala um valor de probabilidade entre 0 e 1 a cada célula do mapa matricial da área em estudo, sendo que no mapa final estes valores são posteriormente convertidos para uma porcentagem em relação à célula com o mais alto valor de probabilidade, o denominado valor cumulativo. Informações detalhadas sobre este algoritmo podem ser obtidas nos trabalhos de Dudik *et al*. (2004), Phillips *et al*. (2004) e Phillips *et al*. (2006).

O algoritmo de aprendizado de máquina Maxent apresenta relativa insensibilidade a conjuntos de dados ruidosos e permite uma abordagem geradora e não discriminante para modelagem preditiva de espécies (PHILLIPS *et al*. , 2006). Este modelo tem a habilidade de lidar com variáveis categóricas e com interações entre variáveis, sendo que estudos iniciais utilizando Maxent sugerem que este algoritmo é mais acurado do que outros métodos de modelagem e mais robusto para analisar amostras com poucos dados de ocorrência (PHILLIPS *et al*. , 2004; ELITH *et al*. 2006).

6.5.6.5. Avaliação de desempenho dos algoritmos de modelagem

Os quatro algoritmos selecionados foram empregados para realizar modelagens preliminares da distribuição de *Leontopithecus caissara* no Domínio da Mata Atlântica, com o intuito de selecionar a alternativa com melhor desempenho para efetuar a classificação geradora do modelo final.

A avaliação de desempenho foi realizada a partir da comparação entre os modelos resultantes dos experimentos com os quatro algoritmos supracitados, tomando com base a estatística AUC ("Area Under the Curve") derivada da análise ROC ("Receiver Operating Characteristic").

A análise da curva ROC é uma ferramenta poderosa para medir o desempenho de modelos preditivos, sendo realizada por meio de um método gráfico simples e robusto, que permite estudar a variação da sensibilidade e da especificidade para diferentes valores de corte. A sensibilidade é também conhecida como taxa de verdadeiros positivos e representa a ausência de erros de omissão ou exclusão. Já a quantidade 1 - especificidade é também chamada de taxa de falsos positivos, representando o erro de comissão ou inclusão (PHILLIPS *et al*., 2006). A curva ROC é obtida pela plotagem da sensibilidade no eixo das ordenadas e pela quantidade 1- especificidade sobre o eixo das abscissas, ao longo dos vários limiares, sendo que a área abaixo da curva ROC está associada ao poder de acerto de um modelo (PHILLIPS *et al*., 2005; RUSHTON *et al*., 2004). Analiticamente a área abaixo da curva ROC pode ser determinada através de métodos de resolução numérica, do tipo regra do trapézio ou por métodos estatísticos como a relação com a estatística U de Mann-Witney e a estimativa de máxima verosimilhança. Geometricamente, a curva ROC é um gráfico de pares x e y, que respectivamente correspondem à especificidade e à

sensibilidade, no chamado plano ROC unitário. A designação de plano ROC unitário deve-se ao fato das coordenadas deste gráfico representarem medidas de probabilidade e por conseguinte variarem entre zero e um. Os valores de AUC iguais a 1 indicam perfeita discriminação, ao passo que escores próximos ou inferiores a 0,5 indicam que a discriminação não é melhor do que uma estimativa aleatória (tab. 6.3). Segundo Hosmer e Lemeshow (2000) valores de AUC inferiores a 0,7 indicam que a discriminação do modelo não chega a ser aceitável.

A estatística AUC tem sido bastante utilizada na literatura de modelagem de distribuição de espécies, sendo uma medida da capacidade de um modelo para discriminar entre locais onde a espécie está presente versus aqueles onde a mesma está ausente (HANLEY e MCNEIL, 1982; FIELDING e BELL, 1997; RUSHTON *et al*., 2004; ELITH *et al*., 2006; PHILLIPS *et al*., 2006).

Tabela 6.3. Classificação dos valores de acurácia de predição dos modelos segundo a estatística AUC ("Area Under the Curve"), derivada da curva ROC ("Relative Operating Characteristic").

AUC	ACURÁCIA
0 - 0.5	Pior que o acaso
> 0.5 – 0.6	Falha ou Nula
> 0.6 – 0.7	Precária ou Baixa
> 0.7 – 0.8	Razoável
> 0.8 – 0.9	Boa
> 0.9 – 1.0	Excelente ou Alta

Fonte: Adaptado de Swets (1988), Hosmer e Lemeshow (2000) e Thuiller (2006).

Na avaliação dos algoritmos de modelagem de distribuição utilizou-se ainda o teste de McNemar (ver métodos do Capítulo 4), que tem sido recomendado na literatura para comparar diferenças em performance de técnicas de modelagem alternativas (DIETTERICH, 1998; de LEEUW *et al*., 2006).

Quanto aos conjuntos de dados de entrada, para esta etapa de seleção de algoritmos o procedimento de modelagem de distribuição utilizou as amostras definidas conforme acima descrito para a variável dependente, consistindo de um conjunto de treinamento (registros positivos de "playback") e outro de teste (registros positivos de estudos prévios). Em relação às variáveis explicativas, nesta etapa foram empregadas apenas as variáveis contínuas bioclimáticas.

6.5.6.6. Modelagem final da distribuição de *Leontopithecus caissara*

A partir dos resultados da avaliação de desempenho da etapa anterior, o algoritmo de melhor performance foi utilizado para efetuar a modelagem final da distribuição da espécie alvo.

Nesta etapa os procedimentos de modelagem foram aplicados em três escalas ascendentes em termos de grão e extensão: a escala da paisagem da península de Superagüi e adjacências, na divisa entre PR e SP (resolução de 30m); a escala da região litorânea entre o norte de SC e o sul de SP (resolução de 90m) e a escala macrorregional/continental do Domínio da Mata Atlântica (resolução de cerca de 1km).

Em cada uma destas escalas os experimentos de modelagem iniciaram apenas com as variáveis bioclimáticas e subseqüentemente incluíram as variáveis morfo-climáticas contínuas (modelos digitais de elevação), as nominais (mapa geológico) e as bióticas e

antrópicas categóricas (mapa de cobertura do solo). Estes experimentos foram realizados com o intuito de investigar a importância das variáveis preditoras ao longo dos domínios de escala. O método Jacknife foi empregado para investigar a importância das variáveis explicativas, através da retirada de uma variável de cada vez no processo de modelagem (PHILLIPS *et al*., 2006; EFRON, 1983).

O resultado da modelagem consiste em um plano de informação cujos valores podem ser interpretados como escores de favorabilidade do hábitat, ou seja, um mapa das áreas potenciais para a ocorrência do elemento alvo.

Constituindo uma das etapas fundamentais deste estudo, a geração do modelo de favorabilidade do hábitat para o mico-leão-da-cara-preta empregou métodos de modelagem de distribuição e procedimentos diagnósticos de geoprocessamento para avaliar a associação entre os descritores do ambiente e a ocorrência da espécie, utilizando esta relação como estimativa de qualidade de hábitat para classificar a favorabilidade ambiental.

Neste ponto cabe tecer algumas considerações sobre as premissas envolvidas em análises e modelagens que tratam de distribuição e relacionamento espécie-hábitat.

Há muito tempo vem sendo evidenciada a existência de uma relação entre distribuição de espécies e características ambientais. Desde que WALLACE (1878) notou que havia uma relação entre abundância animal e gradientes latitudinais, inúmeros artigos foram publicados procurando explicar distribuição e abundância animal em uma base global (ANDREWARTA, 1970; MacARTHUR e WILSON, 1967; WHITTAKER, 1969; MacARTHUR, 1972; BROWN, 1984; HENGEVELD, 1990; RICKLEFS, 1989; MAURER, 1994; entre outros). A observação de padrões de distribuição dos seres vivos tem demonstrado que o arranjo espacial dos organismos na paisagem não é uniforme nem

tampouco aleatório, entretanto, segundo LEGENDRE e FORTIN (1989) este arranjamento parece apresentar uma organização em manchas ou ao longo de gradientes.

Outro ponto de concordância geral é que nenhum fator único pode ser definido como a causa primordial para distribuição e abundância animal. Acredita-se que uma gama de fatores interage para modelar os padrões de distribuição animal, sendo que estes fatores estruturam o espaço onde os animais vivem, gerando complexas variações na qualidade e quantidade de recursos (DE LA VILLE, 1998). Assim, diferenças qualitativas do hábitat, processos de fragmentação ou interações interespecíficas podem resultar em descontinuidades ambientais ao longo do "*continuum"* espacial.

A heterogeneidade espacial representa um tema de grande importância para a biogeografia e assume um papel central na fundamentação teórica da ecologia e da biologia da conservação. Para sugerir como a distribuição de uma espécie poderia ser afetada pela heterogeneidade espacial, MCCOY e BELL (1991) propuseram que as interações ecológicas envolvidas na estrutura do hábitat podem ser resumidas em um modelo gráfico composto por três eixos (fig. 6.4): (1) a *heterogeneidade*, retratando a variação atribuível à abundância relativa de diferentes componentes estruturais; (2) a *complexidade*, referindo-se à variação referente à abundância absoluta de cada componente estrutural individual e (3) a *escala*, caracterizando a variação de acordo com o tamanho da área utilizada para medir heterogeneidade e complexidade.

As interações entre estes componentes produzem processos hierárquicos, que resultam em uma distribuição fragmentada de organismos dentro de áreas com diferente qualidade de hábitat. Conseqüentemente, existe uma maior probabilidade de encontrar uma espécie em hábitats de maior qualidade, que melhor satisfazem seus requerimentos vitais (SCHAMBERGER e O'NEIL, 1986).

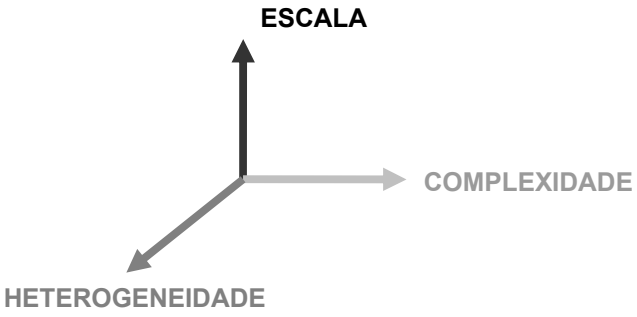


Figura 6.5. Um modelo gráfico dos componentes da estrutura espacial do hábitat. Fonte: MCCOY e BELL (1991).

Dentro do contexto acima exposto, a geração do modelo de favorabilidade do hábitat para *L. caissara* resulta em uma classificação do *"continuum"* ambiental em graus de favorabilidade desde o ótimo habitável até o desfavorável e inóspito para a espécie.

Esta modelagem consistiu em relacionar as 21 variáveis explicativas descritoras do ambiente e a variável dependente representada pelos registros de ocorrência da espécie alvo.

Constituindo uma modelagem de interação espécie-hábitat, o modelo de favorabilidade do hábitat para o mico-leão-da-cara-preta baseia-se em um conceito de hábitat definido como o lugar onde um organismo pode real ou potencialmente viver (ODUM, 1985; KEARNEY, 2006). Adota a assunção fundamental de que um hábitat constitui uma entidade composta por um conjunto de características consistentes e que a espécie pode ser relacionada a cada elemento do hábitat em termos de proporção ao valor de um hábitat em satisfazer suas necessidades vitais (DE LA VILLE, 1998). Esta idéia apóia-se na lógica de que as populações exibem preferências, geneticamente determinadas, por hábitats que favoreçam a sua sobrevivência e reprodução (DE LA VILLE, *op. cit*.). Tal

assunção será aplicada em uma tentativa de registrar a resposta da espécie a diferentes características morfo-geológicas, climáticas, bióticas e antrópicas, dentro de sua distribuição geográfica.

O modelo de favorabilidade de hábitat para *L. caissara* poderia ser considerado como um modelo operacional de planejamento, projetado para otimizar decisões sobre o estabelecimento de hábitat de qualidade ou hábitat favorável para a proteção ou reintrodução da espécie.

De acordo com SHAROV (2000), o modelo e a realidade são ligados através de dois procedimentos: a abstração e a interpretação. A abstração constitui uma generalização, ou seja, envolve considerar os componentes mais importantes de sistemas reais e ignorar os componentes menos importantes, sendo que a importância é avaliada pelo efeito relativo de componentes do sistema sobre sua dinâmica. Já a interpretação significa que os componentes (parâmetros, variáveis) e o comportamento do modelo podem ser relacionados a componentes, características e comportamento de sistemas reais.

Entende-se que modelos são simplificações dos sistemas que procuram representar e assim sendo, perdem resolução para atingir simplicidade (DE LA VILLE, 1998). Contudo, os modelos podem ser calibrados e validados de diversos modos ao longo dos processos de seu desenvolvimento e aplicação (LEVINS, 1966; GASS, 1977; MARCOT *et al*., 1983). Portanto, se a simplificação e sua avaliação forem corretamente executadas, os modelos podem oferecer bom desempenho e confiabilidade para aplicações particulares, além de proporcionar informação que pode conduzir ao melhoramento do modelo. A avaliação é uma tentativa de determinar o grau de correspondência entre o comportamento do modelo e a situação real que o mesmo procura representar (CASWELL, 1976; GASS, 1977; FARMER *et al*., 1982; MARCOT *et al.*, 1983; entre outros). De acordo com

SCHAMBERGER e O'NEIL (1986), um modo de validação indicado para modelos de relacionamentos vida silvestre-hábitat seria a comparação entre as predições do modelo e a ocorrência observada da espécie em relação ao hábitat.

Neste sentido, o desempenho dos modelos finais foi avaliado com base na análise ROC, do mesmo modo já descrito na etapa anterior de seleção de algoritmos, utilizando os registros de "playback" que consistiram as amostras de treinamento, bem como os registros de estudos prévios, empregados como conjunto de teste independente.

6.5.7. CARACTERIZAÇÃO DO HÁBITAT NOS LOCAIS DE REGISTRO DE *L. CAISSARA*

Os estudos de relações espécie-hábitat representam análises fundamentais para o entendimento dos padrões de distribuição da biodiversidade, bem como para o estabelecimento de estratégias para sua avaliação, monitorização, manejo e conservação.

A análise do relacionamento entre a espécie alvo (no caso o mico-leão-da-cara-preta) e o ambiente encontrado ao longo de sua distribuição geográfica procura identificar a relevância das características ambientais para a ocorrência da espécie.

Além da aplicação da metodologia "jacknife" na fase de modelagem, que foi implementada no sentido de avaliar a importância de cada variável ambiental para a distribuição de *L. caissara*, foi efetuada também a assinatura ambiental de cada registro de ocorrência resultante do inventário com "playback" sobre todas as variáveis descritoras do ambiente, com o intutito de investigar a constituição do ambiente nos locais de ocorrência da espécie alvo. A assinatura ambiental é análoga à assinatura espectral, que é muito utilizada na classificação supervisionada de alvos, em sensoriamento remoto, para analisar o comportamento dos alvos em relação às bandas espectrais de uma imagem.

6.5.8. IDENTIFICAÇÃO DO HÁBITAT POTENCIALMENTE DISPONÍVEL PARA *L. CAISSARA*

Esta etapa consiste em investigar que níveis de favorabilidade do hábitat são potencialmente ocupados pela espécie alvo, ou em outras palavras, que porções deste hábitat representam as áreas de potencial ocorrência da espécie.

A partir das superfícies contínuas resultantes da modelagem de distribuição efetuada em cada uma das três escalas analisadas, um mapa binário hábitat potencial / área inóspita para a espécie foi derivado, empregando o ponto de corte escolhido como o melhor entre os limires investigados. Os seguintes limiares, calculados pelo programa Maxent, foram analisados: valor cumulativo fixo de 1, 5, 10; valor mínimo das presenças utilizadas pelo modelo; valor que equaliza sensibilidade e especificidade; valor que maximiza a soma de sensibilidade e especificidade; índice balanceado entre omissão, área predita como potencial e valor de limiar.

Para estimar o hábitat potencialmente disponível para o mico-leão-da-cara-preta, realizou-se também a assinatura de todos os registros de ocorrência sobre o modelo de favorabilidade na escala de maior detalhe, cujo resultado permitirá definir os níveis potencialmente ocupados por *L. caissara*, ou seja, o hábitat da espécie.

Adicionalmente, os resultados desta análise exploratória forneceram os fundamentos para o estabelecimento do limite de favorabilidade do hábitat, que constitui o limiar abaixo do qual o ambiente não é favorável para a reprodução e/ou sobrevivência da espécie, embora indivíduos possam dispersar ou migrar através de ambientes que apresentem favorabilidade inferior a este limite.

6.5.9. PESQUISA DE DISJUNÇÕES NA DISTRIBUIÇÃO

De posse do mapeamento do hábitat potencial para *L. caissara*, foi efetuada uma nova fase de entrevistas e de inventários de campo com "playback" em uma extensão geográfica maior do que a abrangida pela primeira fase destes levantamentos. Para investigar a existência de possíveis disjunções na distribuição da espécie alvo, áreas mapeadas como favoráveis, mas desconectadas daquelas confirmadas no primeiro inventário, foram submetidas a blocos de censos de varredura com "playback".

Após a conclusão desta etapa foram iniciados os procedimentos de delimitação da distribuição geográfica do mico-leão-da-cara-preta.

6.5.10. DELIMITAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE *L. CAISSARA*

Em uma concepção espacialmente explícita, um conceito operacional interessante foi proposto por Soberón (no prelo) para a área de distribuição de uma espécie, que poderia ser entendida como o *conjunto de células em uma matriz representativa do espaço geográfico onde a presença de indíviduos desta espécie pode ser detectada*, sendo este conjunto definido de modo real ou potencial.

Entranto, tendo em vista que este caso de estudo envolve uma espécie ameaçada de extinção, foram adotadas as diretivas da União para a Conservação da Natureza (UICN), as quais recomendam que para este tipo de estudos a área de distribuição geográfica deveria ser estimada através da obtenção da *extensão de ocorrência* e da *área de ocupação* do táxon em análise (IUCN, 2001).

6.5.10.1. Extensão de ocorrência

Extensão de ocorrência ("Extent of Occurrence" - EOC) é definida como a área contida dentro do mais curto limite imaginário contínuo que possa ser delineado para englobar todos os locais conhecidos, inferidos ou projetados de ocorrência presente de um táxon, excluindo casos de vagantes. A extensão de ocorrência freqüentemente pode ser medida pelo polígono convexo mínimo ("convex hull"), que constitui o menor polígono no qual nenhum ângulo interno excede 180 graus e que contém todos os locais de ocorrência (fig. 6.6) (IUCN, 2001, 2006).

6.5.10.2. Área de ocupação

Área de ocupação ("Area of Occupancy" - AOO) de um táxon é definida como a área dentro da sua "extensão de ocorrência" que esteja ocupada por este táxon, excluindo casos de vagantes. A medida reflete o fato de que um táxon normalmente não ocorrerá ao longo de toda a área de sua extensão de ocorrência, a qual pode, por exemplo, conter hábitats desfavoráveis. O tamanho da área de ocupação será uma função da escala de mensuração utilizada e deveria ser medido em uma escala apropriada aos aspectos biológicos relevantes do táxon. Os critérios incluem valores em km² e assim, para evitar erros na classificação, a área de ocupação deveria ser medida sobre uma matriz em que os quadrados apresentem um tamanho adequado para representar a área de distribuição do táxon (fig. 6.6) (IUCN, 2001).

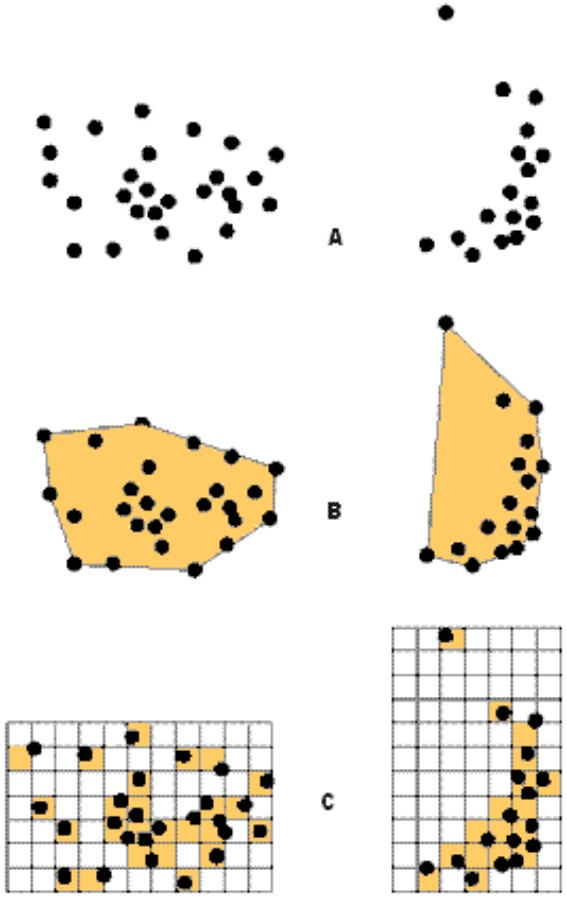


Figura 6.6. Dois exemplos da distinção entre extensão de ocorrência e área de ocupação: (a) é a distribuição espacial de locais de ocorrência conhecidos, inferidos ou projetados; (b) mostra um possível limite para a extensão de ocorrência, que é a área medida dentro deste limite; (c) mostra uma medida de área de ocupação que pode ser obtida pela soma dos quadrados ocupados da matriz. Fonte: Adaptado de IUCN (2001).

Para estimar a extensão de ocorrência do mico-leão-da-cara-preta a tarefa inicial consiste na sobreposição do mapa de registros de ocorrência de *L. caissara* e do mapa de hábitat potencial, a fim de reunir em um único plano de informação todos os registros conhecidos, inferidos ou projetados da espécie. Sobre o plano de informação resultante efetua-se então o traçado do polígono convexo mínimo ("convex hull") englobando todos os registros de ocorrência da espécie, que permite a delimitação da extensão de ocorrência

sensu IUCN (2001, 2006). Dentro do pacote SAGA, utiliza-se o programa Traçavet para traçar o polígono e o módulo Distâncias e Ângulos para medir os seus ângulos internos. A partir do mapa resultante realiza-se planimetria para a obtenção do valor estimado para a área de extensão de ocorrência do mico-leão-da-cara-preta.

No caso da área de ocupação, duas estratégias foram utilizadas para efetuar a estimativa. A primeira estratégia, que segue estritamente as diretrizes mais simplificadas da IUCN (2006), inicia-se pela sobreposição de uma grade com quadrados de 2 x 2km com o mapa contendo todos os tipos de registros de ocorrência da espécie e o polígono de extensão de ocorrência. Efetua-se então a contagem do número de células ocupadas dentro desta grade uniforme, que cobre toda a extensão de ocorrência da espécie, obtendo deste modo a área de ocupação da espécie (AOO = nº células ocupadas x área da célula). Na segunda estratégia para estimar a área de ocupação, que tem como requerimento um mapa prévio do hábitat da espécie alvo, parte-se para uma avaliação entre o mapa de extensão de ocorrência (*sensu* UICN) e o mapa de hábitat modelado, em um procedimento que resultará no mapa da área de ocupação de *L. caissara*. Neste caso, o valor estimado para a área de ocupação da espécie é obtido através da planimetria.

Tanto a estimativa da área de extensão de ocorrência quanto da área de ocupação representam um grande auxílio para a classificação do status de conservação da espécie e para modelagens de viabilidade de hábitat e populações.

6.5.11. ANÁLISE DA ESTRUTURA DO HÁBITAT PARA AS POPULAÇÕES DE *L. CAISSARA*

A perda de hábitat e a fragmentação estão entre as ameaças mais comuns enfrentadas por espécies em extinção. Freqüentemente a perda de hábitat e a fragmentação,

combinadas com a heterogeneidade natural da paisagem, forçam espécies a existir em populações múltiplas que habitam manchas de hábitat relativamente isoladas. Tal coleção de populações da mesma espécie, quando conectadas por migração de indivíduos, pode constituir uma metapopulação (HANSKI e GILPIN, 1991), sendo que nesta estrutura populacional cada grupo componente pode ser denominado de subpopulação, população local, isolado populacional ou simplesmente população (AKÇAKAYA *et al*., 1999) (fig. 6.7).

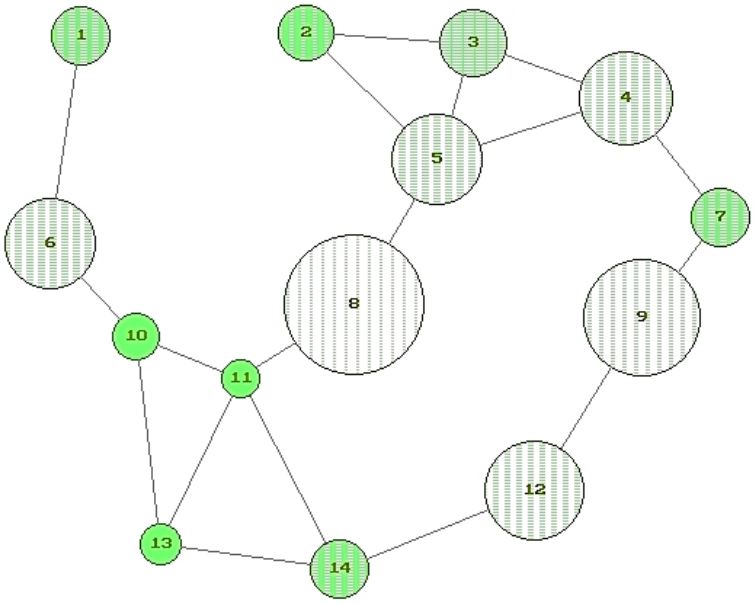


Figura 6.7. Representação abstrata de uma metapopulação. Os círculos representam diferentes populações e as linhas, as conexões migratórias interpopulacionais. Fonte: Adaptado de AKÇAKAYA, 1994; 1999.

É tácito que a fragmentação afeta a qualidade de hábitat de uma determinada espécie dentro de sua distribuição geográfica. Em termos gerais, fragmentação ambiental caracteriza o grau em que manchas semelhantes estão isoladas entre si. O isolamento da

espécie em uma distribuição altamente fragmentada pode induzir à criação de populações geográficas, que por vezes assumem a estrutura de metapopulações. Este termo foi cunhado por LEVINS (1970) que designou metapopulações como um grupo de populações separadas, dotadas de dinâmica e taxas de extinção equivalentes e independentes, o que sugere que espécies existem em um frágil equilíbrio entre extinção e colonização.

De acordo com HARRISON (1994), existe uma grande dificuldade para reunir dados empíricos que possam comprovar esta definição em cada caso específico, de modo que este autor sugere uma definição mais realística e menos poderosa, porém mais útil para planejar estratégias de conservação. Para este autor metapopulações seriam conjuntos de populações co-específicas possivelmente, mas não necessariamente, interconectadas. Existe muito debate em torno do tema metapopulação e conjuntos de populações geográficas, sendo que para alguns autores a noção deveria ser estendida além do modelo clássico de Levins, de modo a englobar classes mais amplas de estruturas populacionais, incluindo modelos alternativos tais como (fig. 6.8): continente-ilha ("mainland-island"); população em manchas ("patchy population"); metapopulação em desequilíbrio ("non-equilibrium metapopulation"); sistema "fonte-escoadouro" ("source-sink systems") (HASTINGS e HARRISON, 1994; DIAS, 1996; HARRISON e TAYLOR, 1997; FRECKLETON e WATKINSON, 2002). Por outro lado, em um dos grupos mais reconhecidos nos estudos de metapopulações, Hanski e colaboradores não concordam em adotar uma noção tão ampla de metapopulação (HANSKI, 1998; 2004). Já para Thomas e Kunin (1999) caracterizar sitemas populacionais empíricos dentro das categorias de estruturas acima realcionadas é uma tarefa difícil, uma vez que existe intergradação entre as classes reconhecidas.

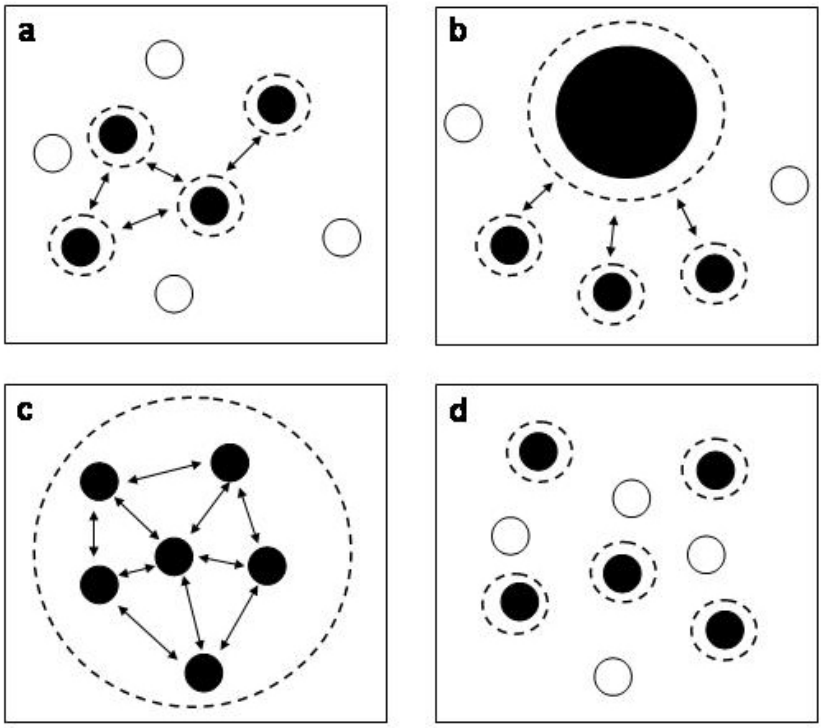


Figura 6.8. Representação esquemática de quatro modelos de populações geográficas: (a) metapopulação clássica de Levins; (b) continente-ilha ("mainland-island"); (c) população em manchas ("patchy population"); (d) metapopulação em desequilíbrio ("non-equilibrium metapopulation"). Os círculos sólidos representam manchas de hábitat ocupadas pela espécie e os círculos vazados, manchas não ocupadas. As linhas indicam movimentos de dispersão. As linhas tracejadas representam os limites das populações. Fonte: Modificado de Harrison (1991) e Harrison e Hastings (1996).

Debates à parte, a teoria da metapopulação assumiu grande importância na pesquisa ecológica, sendo que a partir da década de 1980 a temática de metapopulações e populações geográficas tornou-se um dos paradigmas mais influentes em biologia de conservação (HANKSI, 1989), talvez como resultado da crescente fragmentação dos hábitats utilizados por muitas espécies, sobretudo as ameaçadas ou em perigo de extinção.

A estrutura espacial do conjunto de populações tem importantes efeitos sobre os riscos de extinção e as chances de recuperação, bem como sobre o impacto de perturbações antrópicas para espécies em perigo de extinção e a eficiência de medidas de conservação

para evitar extinções. Assim sendo, os sistemas geográficos de informação podem ser uma ferramenta valiosa para determinar a estrutura espacial da paisagem habitada por espécies ameaçadas de extinção.

A estrutura espacial pode ser entendida como o número, localização, tamanho, forma e qualidade das manchas de hábitat. Estes atributos geográficos determinam várias características biológicas, tais como o número de indivíduos que vivem em uma mancha (abundância) ou o número máximo de indivíduos que podem ser sustentados pelos recursos de uma mancha (capacidade de suporte). Outro fator espacial importante é a distância entre as manchas. Geralmente as manchas isoladas têm menos indivíduos ou são extintas com mais freqüência, uma vez que não recebem imigrantes de outras manchas.

Para que manchas vazias sejam recolonizadas, devem existir algumas manchas ocupadas circunvizinhas, ou seja, as manchas não devem sofrer extinção ao mesmo tempo. Se todas as populações de um metapopulação são afetadas pelos mesmos fatores ambientais, apresentando a mesma sucessão de anos bons e ruins, há um risco alto de que várias populações serão extintas quase ao mesmo tempo, o que limitaria as oportunidades de recolonização (GILPIN, 1988; AKÇAKAYA e GINZBURG, 1991). Normalmente o que determina se os fatores ambientais afetando duas manchas são correlacionados ou não é a distância entre estas manchas, porque a probabilidade dos isolados serem afetados pelos mesmos fatores ambientais aumenta na medida em que diminui a distância entre as manchas.

Neste estudo a análise da estrutura espacial do hábitat consiste na elaboração do modelo de conectividade/fragmentação do hábitat de *L. caissara*, que terá como resultado o mapa de localidades (áreas) das populações.

Cabe esclarecer que segundo a UICN (2001) o termo localidade define uma área geográfica ou ecologicamente distinta na qual um único evento (*e.g.* poluição) rapidamente afetará todos os indivíduos do táxon presente. Uma localidade, em geral, contém a totalidade ou parte de uma subpopulação, representando tipicamente uma pequena proporção da distribuição total do táxon. Seguindo esta concepção, subpopulações são definidas como grupos geograficamente distintos dentro da população, entre os quais existe pouco fluxo gênico, tipicamente da ordem de no máximo um indivíduo migrante bem sucedido ou um gameta por ano.

Considerando que a favorabilidade de hábitat para uma espécie depende de mais de um fator e que alguns destes fatores não são facilmente observáveis, pode-se imaginar que a fragmentação de hábitat que se observa pode diferir da fragmentação percebida do ponto de vista da espécie.

Nesse sentido, o modelo de conectividade/fragmentação do hábitat do mico-leão-da-cara-preta utiliza dois parâmetros que determinam como a espécie percebe a (ou reage à) fragmentação do hábitat: o limite de favorabilidade ambiental e a distância de vizinhança. O limite de favorabilidade do hábitat constitui o limiar abaixo do qual o ambiente não é favorável para a reprodução e/ou sobrevivência da espécie, embora indivíduos possam dispersar ou migrar através de ambientes que apresentem favorabilidade inferior a este limite. A distância de vizinhança é utilizada para identificar células que pertençam à mesma mancha, de modo que células favoráveis (dentro do limite já definido) que estejam separadas por uma distância menor ou igual à distância de vizinhança estabelecida serão reconhecidas como pertencentes a uma mesma mancha (fig. 6.9).

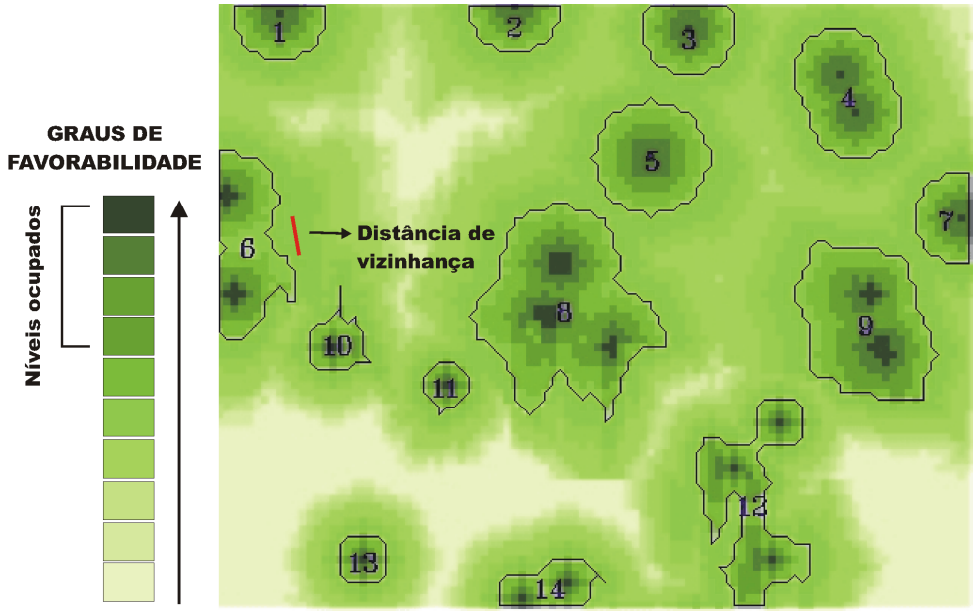


Figura 6.9. Esquema de um mapa de favorabilidade do ambiente para uma espécie hipotética, onde pode ser observada a estrutura espacial das manchas de hábitat disponíveis para as populações, resultante da aplicação de operações de reconhecimento de manchas, que utiliza dois parâmetros: o limite de favorabilidade e a distância de vizinhança. Fonte: Adaptado de AKÇAKAYA, 1994; 1999.

A modelagem de conectividade/fragmentação corresponde a uma seqüência de operações de geoprocessamento, que são realizadas para estabelecer uma distância de vizinhança, uma vez que o limite de favorabilidade ambiental está definido pela área de ocupação.

Seguindo as diretrizes sugeridas por Verbeylen *et al*. (2003), ao invés de adotar uma distância euclidiana absoluta para determinar a distância de vizinhança, optou-se por realizar o cálculo de distância efetiva, ou seja, uma distância custo para o movimento em relação ao atrito ou à impedância ambiental.

A partir de uma adaptação da metodologia de Verbeylen *et al*. (2003) e Catchpole (2006), o cômputo da distância efetiva foi efetuado através de análise de distância custo

pela operação de um algoritmo do tipo crescimento de custo, dentro do pacote Idrisi Kilimanjaro.

Este algoritmo calcula as distâncias efetivas a partir de uma fonte, distâncias estas que são obtidas em unidades de distância custo, levando em conta uma superfície de atrito que descreve a impedância ambiental ao movimento até um determinado limiar estabelecido.

No caso deste estudo, a fonte consitiu em manchas superiores a 100 ha situadas dentro da área de ocupação previamente definida, tendo em vista que a menor estimativa para o espaço vital ("home range") de um grupo de *L. caissara* ultrapassa 170 ha (KLEIMAN e RYLANDS, 2000; HOLST *et al.,* 2006).

Como superfície de atrito empregou-se uma transformação inversa do mapa de favorabilidade do hábitat, que corresponderia a uma gradação de maior possibilidade de aumento de mortalidade para o elemento alvo.

O limiar adotado representou uma distância custo de 2000m. Este valor equivale a duas vezes a distância média da borda ao centro geométrico do "home range" mapeado por Prado (1999), bem como aproxima-se da máxima distância linear de deslocamento da espécie, registrada em estudos de campo com acompanhamento de grupos de micos por radiotelemetria (PRADO, 1999; KLEIMAN e RYLANDS, 2000; HOLST *et al.,* 2006).

No fim desta primeira etapa da modelagem de conectividade/fragmentação, o resultado destes procedimentos para o reconhecimento de manchas resultaram no mapa de localidades (áreas) das populações, que delineia os eco-campos de populações e de redes de populações. A partir deste mapa podem ser obtidos índices descritores da configuração espacial das manchas, tais como tamanho, forma, qualidade e isolamento, entre outros.

Assim sendo, a segunda etapa da modelagem de conectividade/fragmentação do hábitat consiste em uma avaliação do modelo de favorabilidade ambiental com o mapa de localidades (áreas) das populações, que possibilita analisar a qualidade e o grau de fragmentação interna das manchas. Esta avaliação resultará no mapa de favorabilidade de hábitat para as populações.

6.5.12. CLASSIFICAÇÃO DO STATUS DE CONSERVAÇÃO DE *L. CAISSARA*

Desde que as espécies são portadoras de diversidade genética e constituem componentes estruturais dos ecossistemas, informações sobre sua distribuição e status de conservação proporcionam os fundamentos para a tomada de decisão sobre preservação da biodiversidade desde o nível local até o global (IUCN, 2001).

Por mais de trinta anos, a UICN, através da Comissão de Sobrevivência de Espécies (*Species Survival Commission - SSC*), tem avaliado o status de conservação de espécies em uma escala global visando chamar a atenção para os táxons ameaçados de extinção e conseqüentemente promover sua conservação.

As Listas Vermelhas de Espécies Ameaçadas de Extinção produzidas pela UICN constituem uma compilação de espécies de plantas e animais categorizados como Criticamente em Perigo de Extinção; em Perigo de Extinção; ou Vulneráveis, de acordo com as categorias de ameaça da UICN (fig. 6.10). Esta classificação de status de conservação é reconhecida mundialmente e baseia-se em critérios definidos sobre aspectos populacionais, bem como de distribuição geográfica e hábitat.

No presente estudo a classificação do status de conservação de *L. caissara* foi efetuada com base sobretudo nos critérios da UICN que se relacionam a parâmetros da

distribuição da espécie, os quais procuram refletir as condições do hábitat em termos de extensão territorial, qualidade, fragmentação e tendência de declínio.

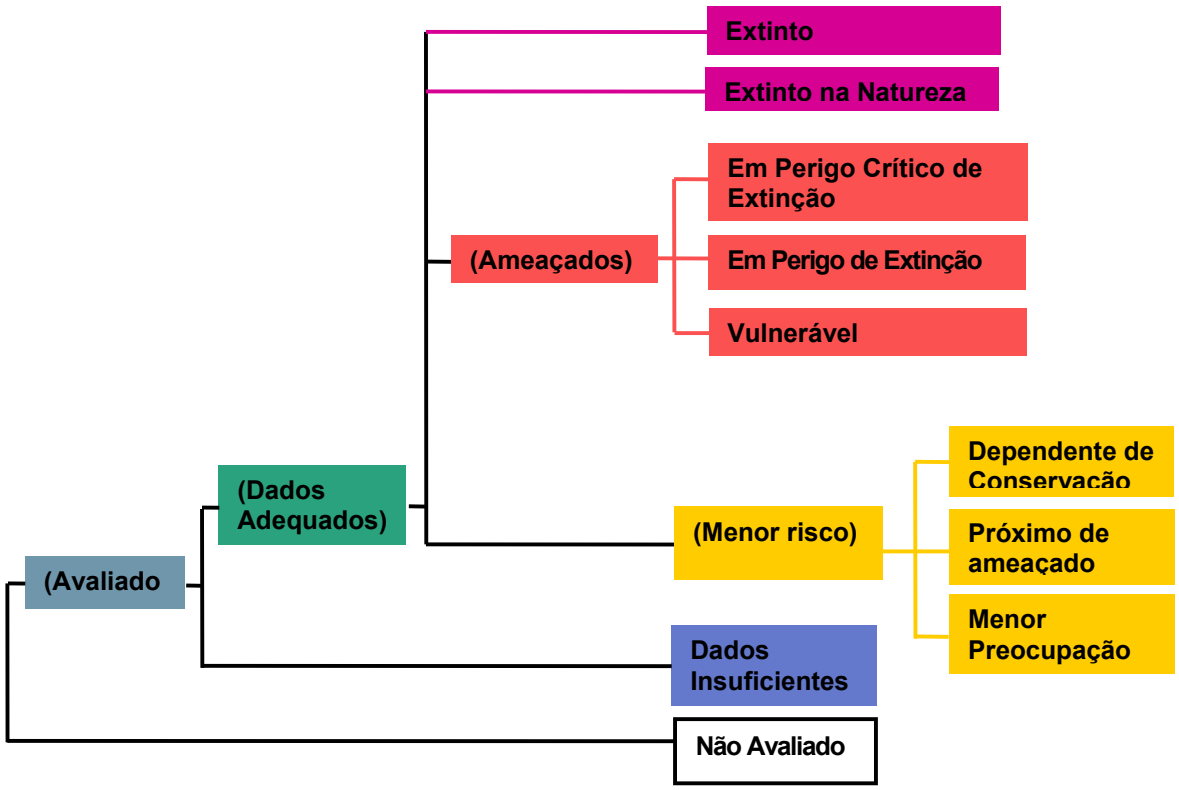


Figura 6.10. Estrutura das categorias da classificação da UICN. Fonte: Adaptado de IUCN (2001).

6.5.13. ANÁLISE DO STATUS DE PROTEÇÃO DO HÁBITAT DE *L. CAISSARA* E INDICAÇÃO DE ÁREAS PARA AÇÕES DE MANEJO

A última fase deste estudo consistiu em uma análise de lacunas ("Gap Analysis") que procurou identificar áreas favoráveis para a espécie alvo, o mico-leão-da-cara-preta,

que não estivessem devidamente protegidas na rede existente de unidades de conservação e que pudessem ser utilizadas em estratégias de manejo e recuperação da espécie.

O termo análise de lacunas ou "Gap Analysis" está relacionado com a identificação de espécies e comunidades naturais que não estejam adequadamente representadas em áreas destinadas para conservação (SCOTT *et al*., 1993). Este tipo de informação pode ser usado para identificar áreas que sejam favoráveis para o desenvolvimento, áreas onde conflitos sobre o uso do solo possam ser evitados, bem como áreas importantes para satisfazer necessidades de conservação. Esta abordagem utiliza sistemas geográficos de informação para identificar "hiatos" ("gaps") na proteção à biodiversidade, que podem ser preenchidos pelo estabelecimento de novas unidades de conservação ou por mudanças nas estratégias de uso do solo (SCOTT *et al., op. cit.*).

A análise realizada nesta etapa utilizou procedimentos de avaliação ambiental por geoprocessamento, a partir do cruzamento do modelo de favorabilidade do hábitat para o mico-leão-da-cara-preta e do mapa de grau de proteção das áreas, que representam, respectivamente, a distribuição das áreas onde a espécie alvo potencialmente ocorre e a distribuição das categorias de manejo de uso do solo.

A partir deste procedimento é possível indicar áreas de hábitats favoráveis para a espécie alvo que não estejam adequadamente protegidas na atual rede de unidades de conservação e que possam ser importantes para o manejo e conservação de *L. caissara*.

6.6. Resultados e discussões

Na mesma seqüência do roteiro metodológico, são apresentados a seguir os resultados das etapas de investigação realizadas no presente estudo sobre a distribuição e status de conservação do mico-leão-da-cara-preta.

6.6.1. LEVANTAMENTO DA OCORRÊNCIA DE *LEONTOPITHECUS CAISSARA*

6.6.1.1. Programa de entrevistas

Em sua totalidade, o programa de entrevistas reuniu 441 entrevistados, que forneceram 925 respostas sobre a ocorrência de *L. caissara*, das quais 745 foram negativas e 180 resultaram positivas. As respostas foram divididas em 24 setores, que constituíram regiões homogêneas quanto à acessibilidade e padrão de uso por parte da população local. Entre os setores, a freqüência de respostas alcançou um mínimo de 12 até o máximo de 139 respostas, com a média em torno de 40 respostas (tab. 6.4). Já a porcentagem de respostas positivas indicou a presença de *L. caissara* apenas para os municípios de Guaraqueçaba (PR) e Cananéia (SP), nos setores nº 13 e 15, uma vez que os demais apresentaram somente respostas negativas (figs. 6.11 e 6.12).

Tabela 6.4. Distribuição das respostas obtidas no programa de entrevistas.

SETOR	LOCALIDADE	POSITIVAS	NEGATIVAS	TOTAL
1	Barra do Una, Praia do Una, Serra do Itatins, Espraiado, Ponta da Juréia, Prelado	0	41	41
2	Alto do Peropava, Paraíso Mirim, Tucum, Coveiro, Serra do Pouso Alto, Peropava	0	12	12
3	Umbeva, Aldeia, Barra do Ribeira, Costeira da Barra, Aguapeu	0	21	21
4	Iguape, Icapara, Campo Largo, Estaleiro, Serra do Pocinho	0	13	13
5	Rocio, Ilha Grande, Mumuna, Braço Preto, Bocuí, Jairê	0	31	31
6	Pariquea-açú, Braço Largo, Simbiúva, Vapá Mirim, Treze de Maio, Pariquera Mirim, Rio do Braço, Pindaúba de Cima	0	43	43
7	Subaúna, Nanaú, Serra do Cordeiro, Faz. Esteiro do Morro	0	22	22
8	Ilha Comprida, Ilha de Cananéia	0	33	33
9	Itapitangui, Cubatão, Serra do Quilombo, Palmeiras, Iririaia-açú	0	59	59
10	Mandira, Taquari, Santa Maria, Ipiranguinha, Capuava	0	75	75
11	Três Pontões, Serra da Virgem Maria, Serra Negra, Serra do Morato, Agudinho	0	39	39
12	Batuva, Morato, Guaraqueçaba, Ilha do Rabelo, Serra do Tromomô, Poruquara, Rio Verde, Cedro	0	40	40
13	Rio Branco, Rio Vermelho, Araçaúba, Bonito, Barranco Alto, Ariri, Morro do Costa, Rio dos Patos, Morro do Sebuí, Barra do Poruquara	41	87	128
14	Ilha do Cardoso, Marujá, Santa Cruz, Praia da Laje, Enseada da Baleia	0	26	26
15	Ilha de Superagui, Ararapira, Barra do Ararapira, Vila Fátima, Canudal, Barbados, Morro das Pacas, Barra do Superagui	125	14	139
16	Ilha das Peças, Bertioga, Tibicanga, Guapicú	0	44	44
17	Tagaçaba, Borrachudo, Potinga, Pacotuva, Saco do Tambarutaca, Taquanduva, Itaqui, Ilha Rasa, Piaçaguera	0	23	23
18	Cachoeira de Cima, Mergulhão, Cacatu, Porto Limoeiro	0	19	19
19	Faisqueira, Xaxim, Antonina, Sambaqui, Itapema, Faz. Zoada d'Água, Rio das Pedras, Rio Sagrado	0	17	17
20	Morretes, Porto de Cima, Marumbi, Manancial da Serra, Fortuna, Véu da Noiva	0	18	18
21	Limeira, Canasvieiras, Alto da Serra, Represa de Guaricana, Morro Ingês	0	19	19
22	Imbuguaçú, Guaraguaçu, Pai Antônio, Gleba Jacarandá, Colônia Pereira, Colônia Maria Luiza, Cambará, São Luís, Paranaguá	0	34	34
23	Pontal do Sul, Ilha do Mel, Ilha Rasa da Cotinga, Ilha da Cotinga, Maciel, Pontal do Poço, Valadares	0	20	20
24	Matinhos, Cabaraquara, Caiobá, Cubatão, Guaraparim, Sambaqui, Guaratuba, Descoberto	0	47	47

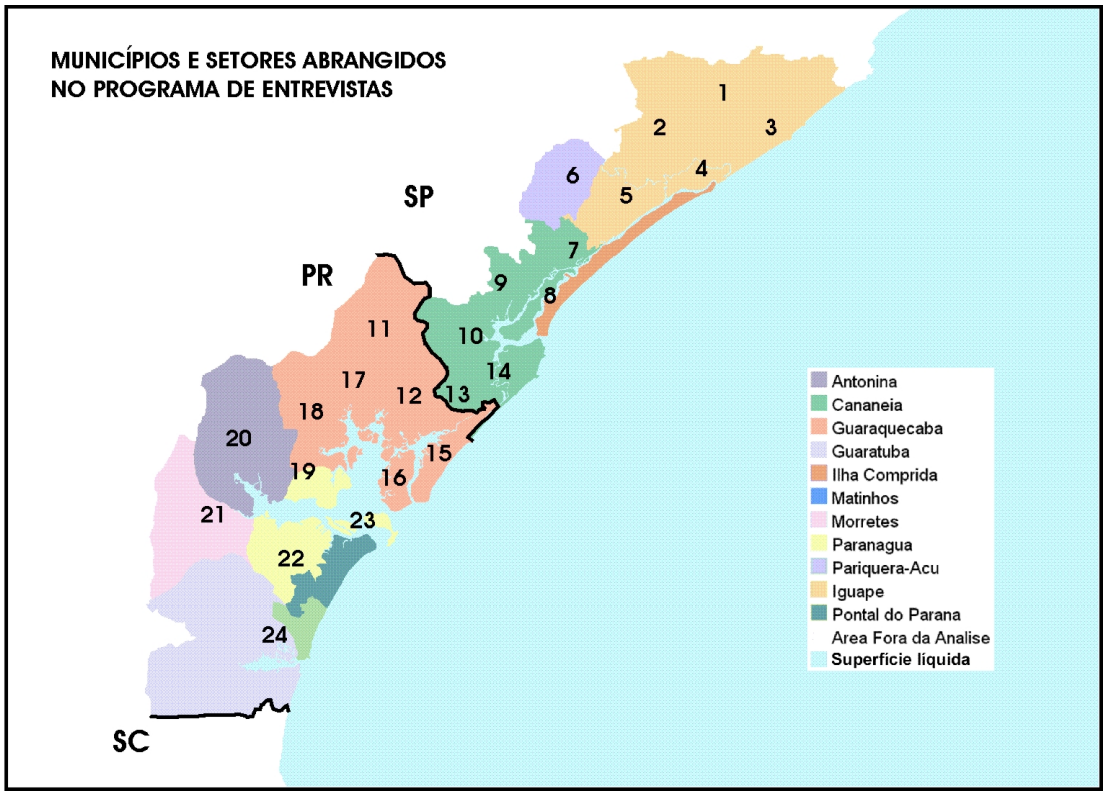


Figura 6.11. Mapa com a distribuição dos setores e municípios abrangidos no programa de entrevistas.

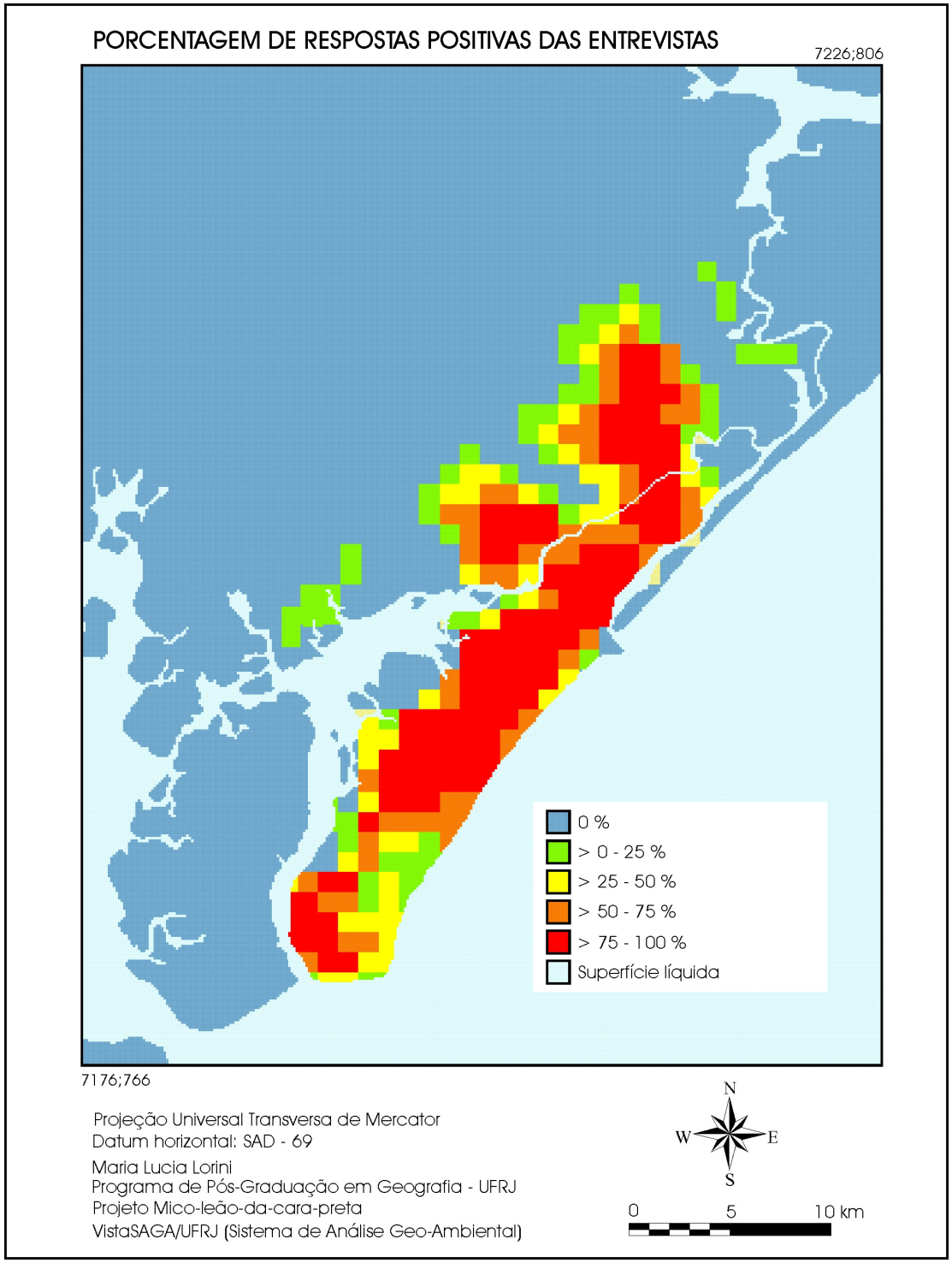


Figura 6.12. Mapa de porcentagem de respostas positivas das entrevistas.

6.6.1.2. Inventário de campo da presença de *L. caissara* com "playback" de vocalizações.

Orientado pelos resultados do programa de entrevistas, o inventário da ocorrência de *L. caissara* com auxílio da técnica de "play back" cobriu um total de 10.000 ha. Ao longo das 50 unidades amostrais de 200 ha, o procedimento de varredura detectou a presença da espécie em 36% (n = 18) das áreas investigadas. Um simples exame das figuras 6.12 e 6.13 e da tabela 6.5 demonstra que os resultados obtidos pelo programa de entrevistas e pelo levantamento com "play back" apresentam-se bastante congruentes, haja visto que a totalidade das amostras negativas localizam-se na zona de entrevistas exclusivamente negativas, enquanto que a maioria (67,2%) das áreas positivas para o "play back " encontram-se na zona de entrevistas 100% positivas.

Tabela 6.5. Comparação dos resultados globais obtidos no programa de entrevistas e no inventário com "playback" realizados para investigar a ocorrência de *L. caissara*.

Áreas com respostas positivas de entrevistas	*Blocos censados com resultados negativos*	*Blocos censados com resultados positivos*
80 - 100%	32.8%	67.2%
40 - 80%	68.8%	31.2%
0 - 40%	88.5%	11.5%
0%	100%	0%

Ao final do inventário com "playback" , dentro dos 18 blocos censados com resultados positivos foram assinaladas 26 áreas de ocorrência registrada de *L. caissara* (fig. 6.13).

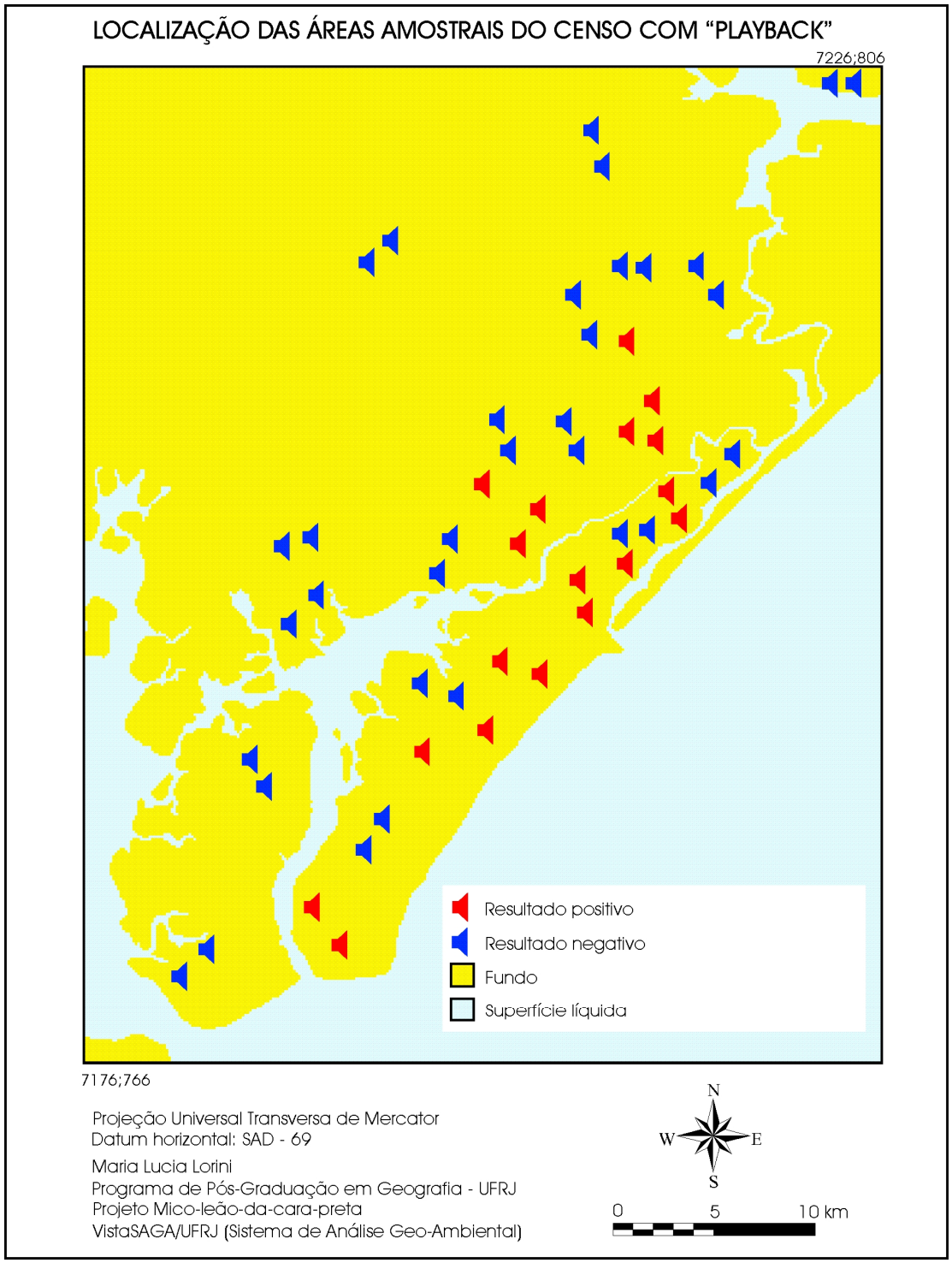


Figura 6.13. Mapa mostrando os blocos com resultados positivos e negativos em relação à pesquisa de ocorrência de *L. caissara* realizada pelo inventário com "playback".

6.6.1.3. Levantamento de registros de ocorrência de *L. caissara* obtidos em estudos prévios

O levantamento dos outros registros positivos para a presença da espécie, que foram obtidos anteriormente aos inventários aqui descritos (ver PERSSON e LORINI, 1993; LORINI e PERSSON, 1994) e que satisfizeram os critérios de posicionamento para a escala de 1:50.000, totalizou 33 áreas de ocorrência registradas para o mico-leão-da-cara-preta (fig. 6.14).

A distribuição destes registros mostra grande congruência com os resultados obtidos pelo programa de entrevistas e pelo inventário com "playback" (ver figuras 6.12 e 6.13). Uma única localização positiva, representada por um registro auditivo obtido em 1990 na planície do Sebuí, encontra-se situada na zona de mais baixa freqüência de respostas positivas (0 - 25%) no programa de entrevistas. Esta localidade foi posteriormente inventariada com "playback" e os resultados foram também negativos, sem retorno de indícios da presença da espécie nos dois blocos censados. Considerações sobre esta discrepância na ocorrência de *L. caissara* na planície do Sebuí poderiam incluir tanto falha de registro quanto introdução, migração ou extinção local. Na hipótese de falha de registro, duas situações poderiam ser cogitadas, sendo que no primeiro caso, o resultado negativo do censo com "playback" seria fidedigno e então a primeira ocorrência auditva não representaria um registro efetivo e as poucas respostas positivas das entrevistas também seriam equivocadas. Na segunda situação, a primeira ocorrência auditiva representaria um registro fidedigno e as poucas respostas positivas das entrevistas também estariam corretas, mas o censo com "playback" não teria sido efetivo em registrar a presença da espécie. Por outro lado, em uma terceira situação, caso os registros positivos anteriores e os resultados

negativos do censo com “playback” sejam efetivos, um possível episódio de introdução, migração ou extinção local poderiam ser inferidos.

6.6.2. MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO

6.6.2.1. Seleção e preparação das variáveis

Estes prodecimentos resultaram em um conjunto de 21 variáveis explicativas, distribuídas em quatro grupos de descritores morfo-geológicos, climáticos, bióticos e antrópicos.

A partir dos levantamentos de ocorrência da espécie alvo, os dados referentes à variável dependente resultaram em três conjuntos de amostras que satisfizeram os requerimentos de independência e ausência de auto-correlação espacial: registros de presença para treinamento, derivados do censo com “playback” (250 pixels, I de Moran = 0,008); registros de presença para teste, derivados dos registros de estudos prévios (100 pixels, I de Moran = 0,009) e registros de provável ausência, derivados dos blocos com resultado negativo no censo com “playback” (250 pixels, I de Moran = 0,006).

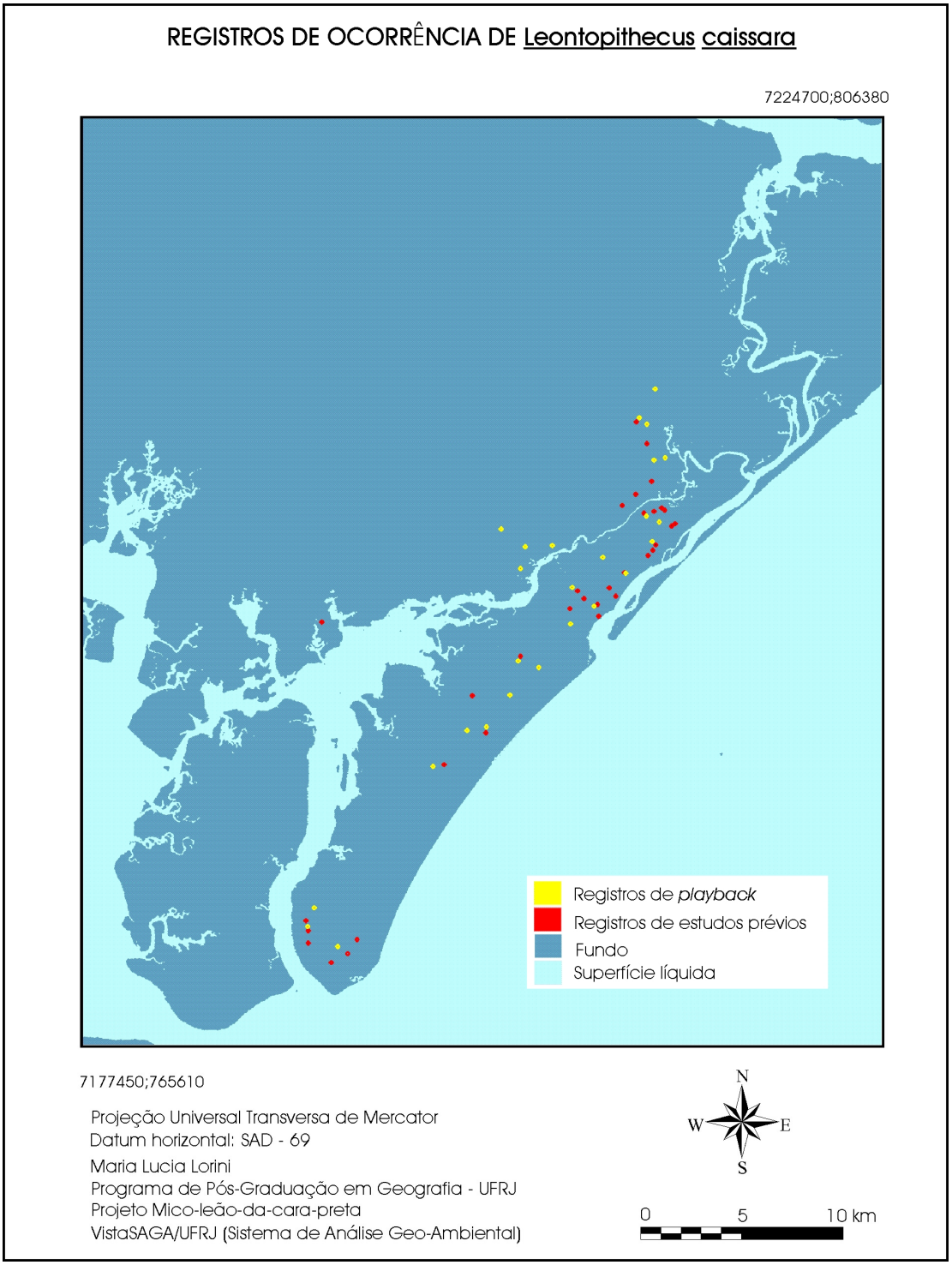


Figura 6.14. Mapa de registros de ocorrência de *L. caissara*.

6.6.2.2. Avaliação de desempenho dos algoritmos de modelagem

Os quatro algoritmos selecionados foram empregados para realizar modelagens preliminares da distribuição de *Leontopithecus caissara*, tomando como entradas as 18 variáveis explictivas bioclimáticas e os registros de treinamento presença, bem como os de provável ausência para o algoritmo LDA de Fisher.

O resultado da modelagem efetuada com a aplicação de cada um dos quatro modelos foi avaliada com base na estatística AUC ("Area Under the Curve") resultante da análise ROC sobre o conjunto de registros de presença para teste, conforme descrito na seção de material e métodos.

A comparação do desempenho dos quatro modelos Bioclim, Domain, LDA de Fisher e Maxent encontra-se demonstrada na tabela 6.6.

Tabela 6.6. Resultado da análise ROC para a modelagem de distribuição da espécie alvo efetuada pelos quatro algoritmos selecionados com base nas 18 variáveis bioclimáticas. Significância estatística do teste de McNemar: ** (p<0,01); * (p<0,05); *n.s*. (não significativo).

	Maxent	Domain	Bioclim	LDA de Fisher
Maxent	*0.945*	*	**	**
Domain		*0.883*	*n.s.*	*
Bioclim			*0.853*	*n.s.*
LDA de Fisher				*0.845*

Como pode ser observado na tabela acima, todos os modelos apresentaram um desempenho melhor do que o de uma estimativa aleatória, já que todos os valores de AUC foram superiores a 0,5.

De fato, de acordo com a classificação dos valores de acurácia de predição dos modelos segundo a estatística AUC, todos os algoritmos geraram resultados de bons (Domain, Bioclim, LDA de Fisher) a excelentes (Maxent).

Os resultados apresentados na tabela 6.6 também demonstram que o melhor desempenho foi alcançado pelo algoritmo de aprendizado de máquina baseado na Máxima Entropia, modelo que atingiu o maior valor de AUC (0,945) obtido, sendo estatisticamente superior às predições de todos os outros modelos.

Em uma posição intermediária em termos de performance encontram-se os modelos de envelope climático, sendo que o modelo obtido com a métrica de Gower pelo algoritmo Domain (0,883) superou o desempenho alcançado pelo envelope climático mais simples, o modelo Bioclim (0,853), embora esta diferença não tenha sido estatisticamente significante.

Já o outro modelo estatístico do conjunto daqueles que supõem ausência, o algoritmo linear discrimante de Fisher, foi o modelo que obteve o menor dos valores de AUC (0,845) entre todos os avaliados, sendo que sua predição foi estatisticamente inferior às predições efetuadas por Maxent e Domain.

Estes resultados concordam com aqueles reportados em Phillips *et al*., 2006 e em Elith *et al*., 2006, no sentido de apontar uma melhor performance para o modelo de Máxima Entropia, sugerindo que este melhor desempenho do algoritmo bayesiano não-linear resulta de sua habilidade em ajustar respostas e interações complexas, bem como de selecionar um conjunto relevante de variáveis.

Partindo destes resultados, na etapa subseqüente a modelagem final de distribuição de *L. caissara* foi desenvolvida com o algoritmo Maxent.

6.6.2.3. Modelagem final da distribuição de *Leontopithecus caissara*

Nesta fase os procedimentos de modelagem de distribuição de *L. caissara* empregando o algoritmo Maxent foram aplicados em três escalas ascendentes em termos de grão e extensão: a escala da paisagem da península de Superagüi e adjacências, na divisa entre PR e SP (resolução de 30m); a escala da região litorânea entre o norte de SC e o sul de SP (resolução de 90m) e a escala macrorregional/continental do Domínio da Mata Atlântica (resolução de cerca de 1km).

Em cada uma das três escalas foram efetuados dois experimentos de modelagem em uma seqüência de inclusão das variáveis explicativas que iniciou apenas com as variáveis bioclimáticas, para em um segundo momento incluir também as variáveis morfo-climáticas contínuas (modelos digitais de elevação) e nominais (mapa geológico), bem como as bióticas e antrópicas categóricas (mapa de cobertura do solo). Todos os experimentos foram executados com a abordagem "jacknife", retirando uma variável de cada vez para analisar a sua importância na construção do modelo.

Como demonstrado na tabela 6.7, os resultados obtidos por estes experimentos indicam que os modelos gerados alcançaram excelente performance, com valores de AUC de teste superiores a 0,96 em todos as escalas e resoluções adotadas, ainda que de um modo geral tenha ocorrido uma melhora de desempenho com a diminuição da resolução espacial. As predições geradas por estes modelos obtiveram valores de AUC de teste estatisticamente significantes ($p<0,0001$), com base em testes binomiais de omissão efetuados automaticamente em Maxent.

Os experimentos envolvendo apenas variáveis bioclimáticas contínuas como variáveis explicativas foram bastante congruentes ao longo de todas as escalas, indicando

que as variáveis descrevendo precipitação no período mais seco apresentaram os melhores resultados quando modeladas individualmente (tab. 6.7). Do mesmo modo esta série de experimentos concordou em apontar que a variável temperatura mínima do mês mais frio é o preditor que mais decresce a performance do modelo quando retirada do conjunto de variáveis.

Estes resultados parecem concordar com aqueles obtidos por Grelle e Cerqueira (2006) em um experimento de modelagem de distribuição envolvendo *Callithrix flaviceps*, outra espécie de primata da família Callithrichidae endêmica da Mata Atlântica. Estes autores indicaram que as variáveis climáticas relativas à temperatura mínima, precipitação e umidade foram os preditores que apresentaram um relacionamento significativo com a ocorrência da espécie, segundo o modelo obtido por regressão logística passo a passo.

Os resultados obtidos parecem indicar que os determinantes da distribuição de *L. caissara* estariam associados a variáveis que descrevem o estresse climático no período de menor temperatura e menor pluviosidade, que na região corrresponde aos meses de junho a agosto, época em que também ocorrem os episódios de geada. Neste sentido, vale ressaltar que o mico-leão-da-cara-preta provavelmente encontra-se no limite de tolerância fisiológica a baixas temperaturas, uma vez que representa a espécie mais meridional da família Callithrichidae, um grupo de pequenos primatas de ocorrência largamente tropical. Cabe também lembrar que em condições de cativeiro os micos-leões apresentam maior mortalidade em condições de baixa temperatura (Pissinati, com. pess.) e de pouca incidência de luz solar (Schwarz, com. pess.). O período de junho a agosto também representa o intervalo de menor produtividade de frutos, que constituem a principal fonte de recursos alimentares para o mico-leão-da-cara-preta (PRADO, 1999) .

Tabela 6.7. Resultados da análise ROC de avaliação de desempenho e da importância de variáveis explicativas para os experimentos de modelagem nas três escalas espaciais.

escala geográfica	***paisagem***	***região***	***macrorregião/bioma***
extensão	Península de Superagüi e adjacências	Região litorânea norte de SC a sul de SP	Domínio da Mata Atântica
resolução	30m	90m	1km
experimento apenas com variáveis bioclimáticas			
AUC treinamento	0.966	0.999	0.999
AUC teste	0.966 *(p<0,0001)*	0.998 *(p<0,0001)*	0.999 *(p<0,0001)*
ganho total (treinamento)	1.882	3.343	3.636
maior ganho individual (ganho da variável)	precipitação do mês mais seco (1.678)	precipitação do trimestre mais seco (3.196)	precipitação do trimestre mais quente (3.538)
ausência que mais decresce o ganho (ganho sem a variável)	temperatura mínima do mês mais frio (1.843)	temperatura mínima do mês mais frio (3.339)	temperatura mínima do mês mais frio (3.630)
experimento com variáveis bioclimáticas , morfo-geológicas , bióticas e antrópicas			
AUC treinamento	0.988	0.999	0.999
AUC teste	0.984 *(p<0,0001)*	0.998 *(p<0,0001)*	0.999 *(p<0,0001)*
ganho total (treinamento)	2.543	3.538	3.660
maior ganho individual (ganho da variável)	cobertura do solo (1.975)	cobertura do solo (3.238)	precipitação do trimestre mais quente (3.538)
ausência que mais decresce o ganho (ganho sem a variável)	cobertura do solo (2.364)	substrato geológico (3.472)	substrato geológico (3.649)

Na série de experimentos que incluíram também as variáveis morfo-geológicas, bióticas e antrópicas, já são observadas algumas diferenças entre as escalas, como por exemplo, o fato de que a inclusão destas variáveis produziu melhora de desempenho mais nítida na escala de maior detalhe (tab. 6.7).

Em relação à importância das variáveis, nota-se que na escala de maior detalhe o descritor biótico-antrópico, representado pela variável cobertura do solo, destaca-se como aquela que individualmente produz o melhor modelo e também como a variável cuja ausência implica em maior perda de desempenho (tab. 6.7, fig. 6.15).

Na escala regional de resolução intermediária, esta variável ainda produz o melhor modelo, mas o descritor que mais reduz a performance quando retirado da modelagem passa a ser a variável substrato geológico (tab. 6.7, fig. 6.16).

Para a escala macrorregional de bioma, de maior extensão e menor resolução, o substrato geológico continua a representar a maior perda para o desempenho quando ausente, contudo, a variável que sozinha produz o melhor modelo passa a ser o descritor bioclimático de precipitação do trimestre mais seco (tab. 6.7, fig. 6.17).

Estes resultados estão em concordância com a idéia de que, embora o clima atue como restritor da distribuição de espécies em várias escalas, a sua importância como agente determinante da distribuição expressa-se principalmente em escalas geográficas de grande extensão (WHITTAKER *et al*., 2001; RAHBEK e GRAVES, 2001; WILLIS e WHITTAKER, 2002; THUILLER *et al*., 2004).

Com respeito à variável de cobertura do solo, em modelagem de distribuição de espécies na escala do continente europeu, Thuiller *et al*. (2004) demonstraram que a adição desta variável ao conjunto de preditores bioclimáticos não melhorou a performance preditiva dos modelos. Por outro lado, Pearson *et al*. (2004) indicaram que os modelos de distribuição apresentaram boa melhora com a inclusão da variável cobertura do solo, em experimentos com a distribuição de plantas na escala macrorregional da Grã-Bretanha. Neste contexto, os resultados obtidos no presente estudo concordam com a afirmação Thuiller *et al*. (2004) apenas para a escala macrorregional de bioma, uma vez que os experimentos realizados nas escalas de região e de paisagem indicam o contrário. De fato, nestas escalas de maior resolução e menor extensão os resultados apontaram que a inclusão da variável cobertura do solo aumenta sensivelmente a performance preditiva do modelo. Neste sentido, os resultados corroboram a idéia de que a importância da variável de

cobertura do solo depende da resolução espacial dos dados, sendo provável que em resoluções espaciais mais detalhadas esta variável apresente maior poder preditivo do que as variáveis climáticas (PEARSON e DAWSON, 2003; PEARSON *et al*., 2004; THUILLER *et al*., 2004; TERMANSEN *et al*., 2006).

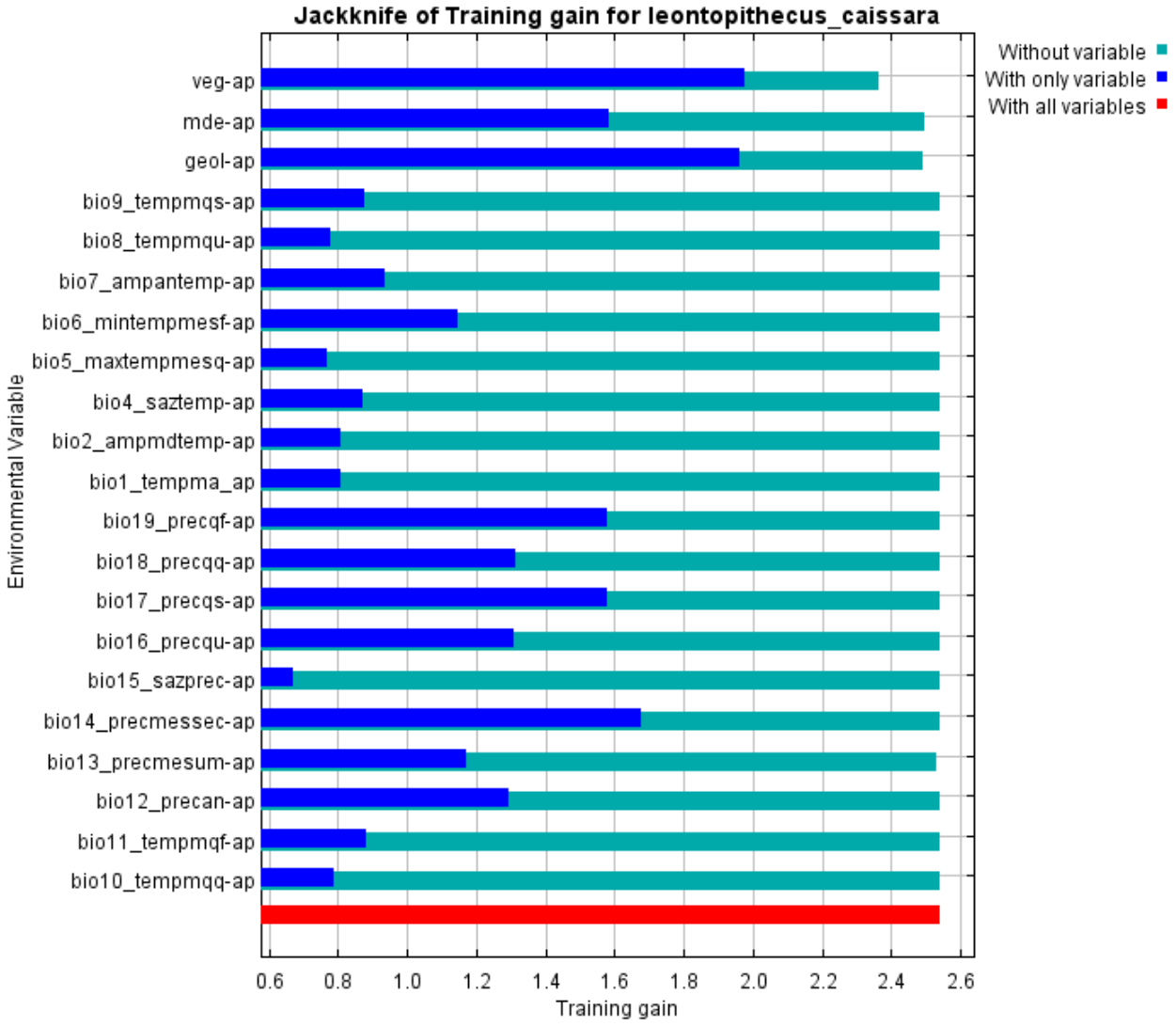


Figura 6.15. Resultados do método "jacknife" para avaliar a importância das variáveis no experimento com todas as variáveis explicativas na escala de detalhe (paisagem, 30m).

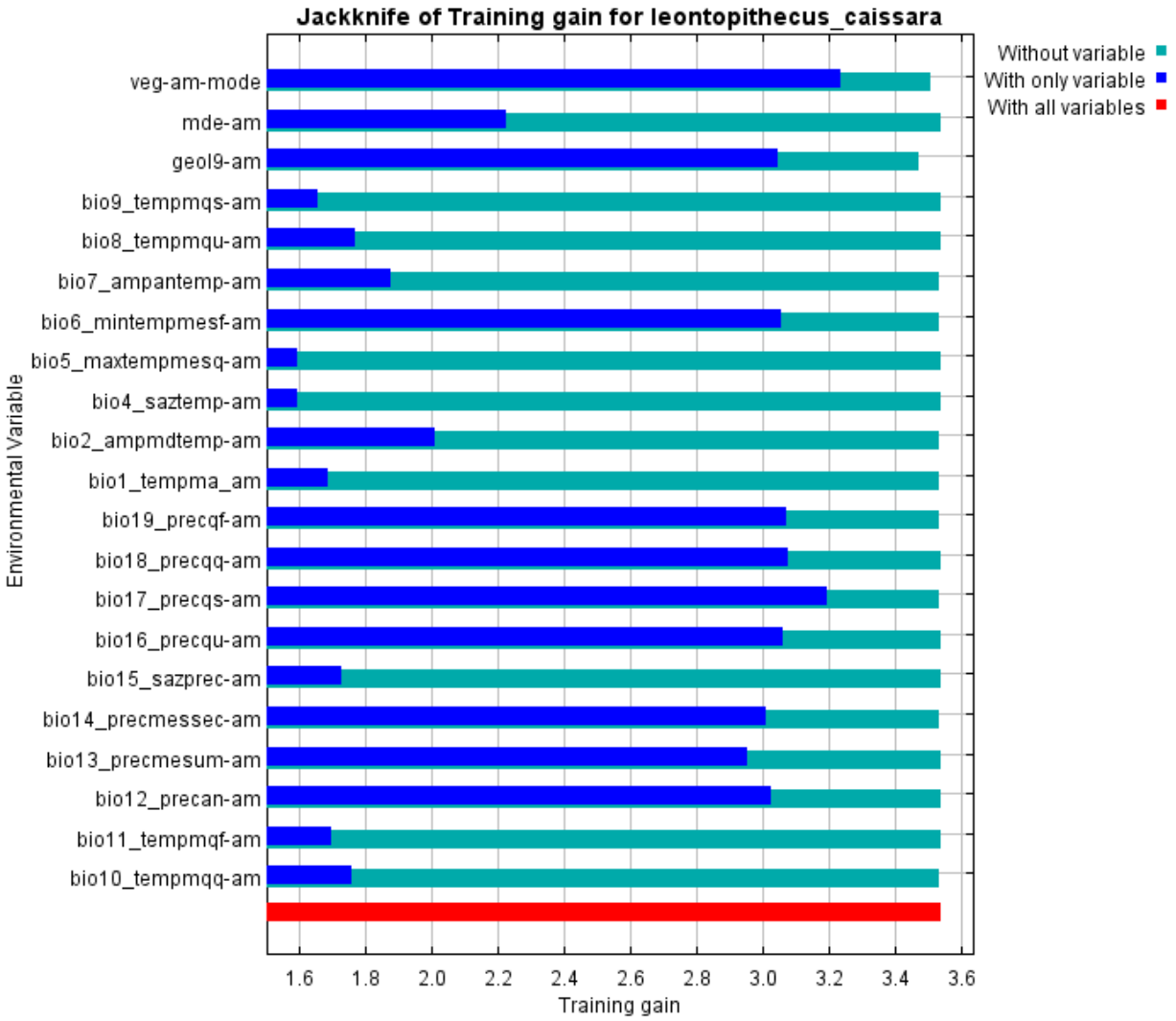


Figura 6.16. Resultados do método "jacknife" para avaliar a importância das variáveis no experimento com todas as variáveis explicativas na escala intermediária (região, 90m).

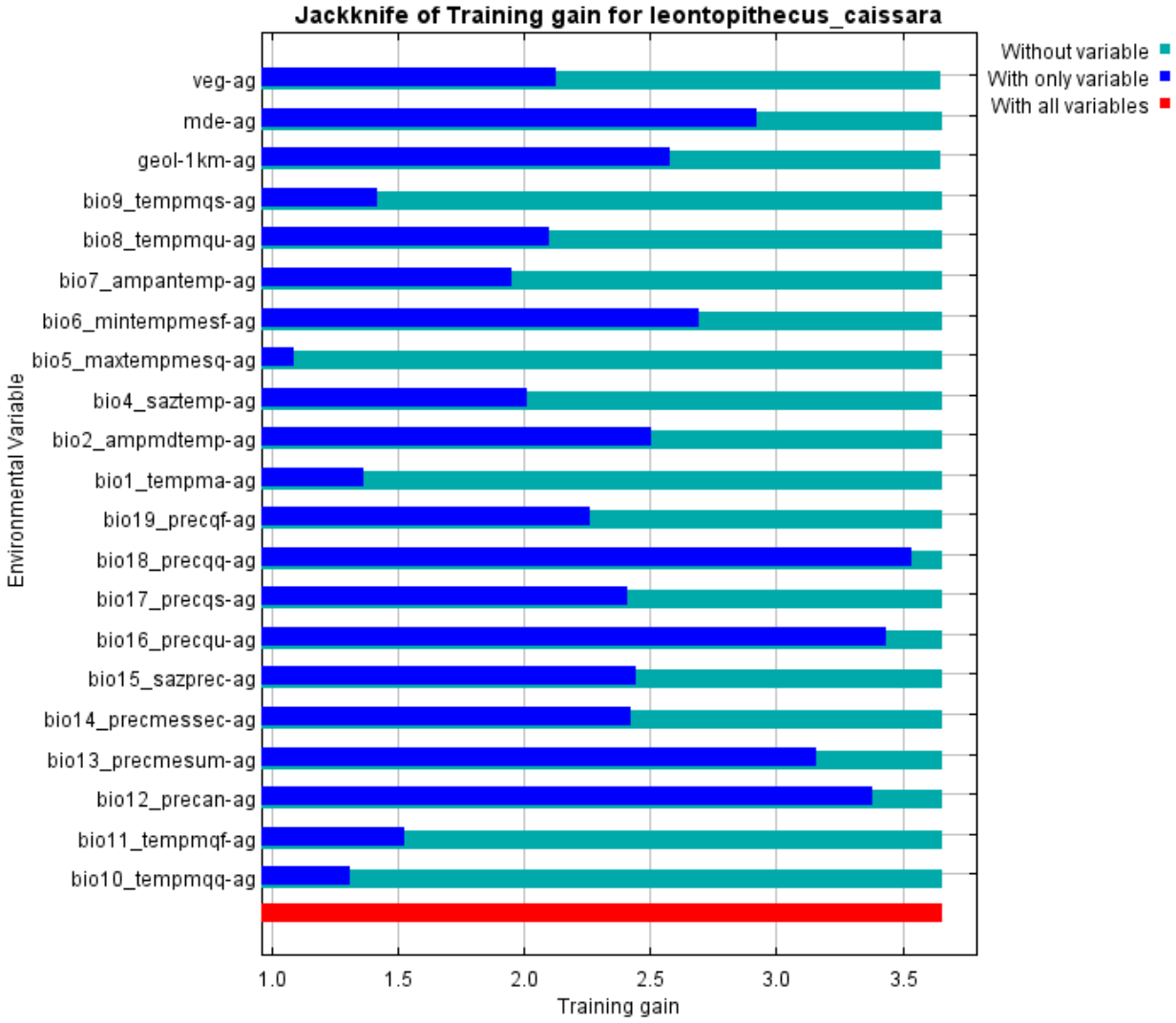


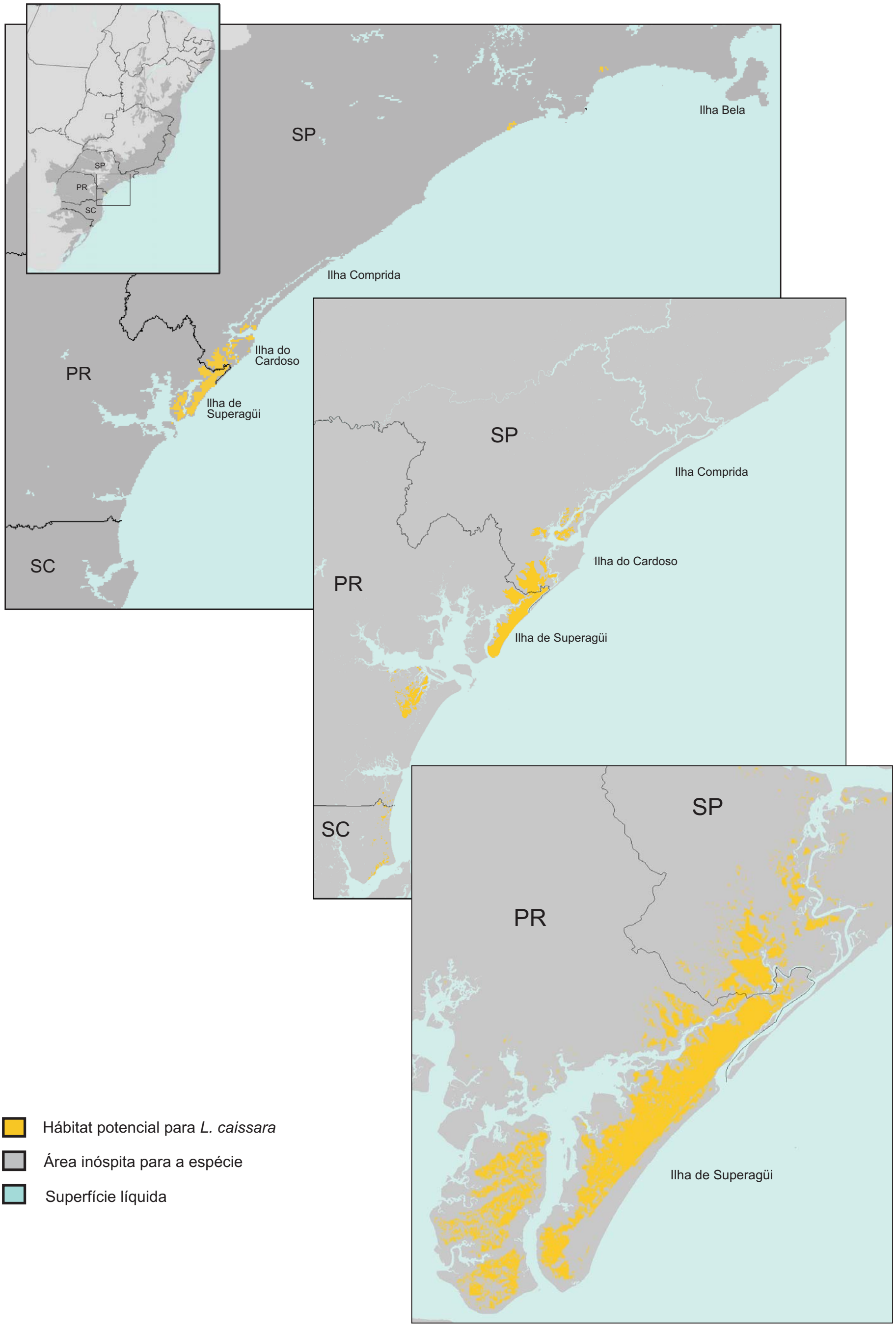
Figura 6.17. Resultados do método "jacknife" para avaliar a importância das variáveis no experimento com todas as variáveis explicativas na escala de menor detalhe (macrorregião/bioma, 1km).

Como os experimentos com todas as variáveis apresentaram melhor desempenho, esta série de modelagens foi escolhida para mapear a distribuição do hábitat potencial para *L. caissara* nas três escalas adotadas.

Para cada uma das três escalas, a superfície de valores contínuos resultante da modelagem foi transformada em um mapa binário hábitat potencial / área inóspita (fig. 6.18), tomando como ponto de corte o limiar que maximiza o valor de sensibilidade para baixos valores de (1 - especificidade). Este limiar, que visa estabelecer o ponto em que o modelo atinge a maior taxa de verdadeiros positivos e a menor de falsos positivos, foi o que produziu os melhores resultados, o que concorda com indicações encontradas na literatura (LIU *et al*., 2005; JIMÉNEZ-VALVERDE e LOBO, no prelo).

Figura 6.18. Distribuição potencial de *Leontopithecus caissara* em escala global (domínio da Mata Atlântica), regional (norte de SC a sul de SP) e de paisagem (Guarauqeçaba-PR e Cananéia-SP).

Distribuição potencial de *Leontopihtecus caissara*



Hábitat potencial para *L. caissara*

Área inóspita para a espécie

Superfície líquida

6.6.3. IDENTIFICAÇÃO DO HÁBITAT POTENCIALMENTE DISPONÍVEL PARA *L. CAISSARA*

A partir destas modelagens foram produzidos os mapas de favorabilidade do hábitat. Na escala de maior detalhe, este mapa resultou do fatiamento da matriz original com valores contínuos cumulativos gerada pelo algoritmo Maxent em oito classes de favorabilidade do ambiente, desde o ótimo habitável até o inóspito indisponível: Ótimo 1 (90 -100); Ótimo 2 (70 > 90); Ótimo 3 (50 < 70); Ótimo 4 (30 > 50); Sub-ótimo 1 (15 > 30); Sub-ótimo 2 (7 > 15); Inóspito 1 (0.5 > 7) e Inóspito 2 (0.5 - 0).

O fatiamento em oito níveis de favorabilidade foi efetuado de acordo com os seguintes limiares: Ótimo 1 para 2 (15º percentil das presenças de treinamento utilizadas no modelo); Ótimo 2 para 3 (50º percentil); Ótimo 3 para 4 (85º percentil); Ótimo 4 para Sub-ótimo 1 (90º percentil); Sub-ótimo 1 para 2 (95º percentil); Sub-ótimo 2 para Inóspito 1 (valor mínimo das presenças de treinamento utilizadas no modelo) e Inóspito 1 para 2 (1º percentil das presenças de todos os conjuntos de registros inclusive as não utilizadas no modelo).

O resultado das assinaturas ambientais dos registros de ocorrência oriundos do censo por "playback" efetuadas sobre o mapa de favorabilidade gerado para a escala de maior detalhe (tab. 6.8) demonstrou que mais de 80% destes registros correspondem aos níveis ótimo 1 a 4, cerca de 17% situam-se nos níveis sub-ótimo 1 e 2, sendo que pouco mais de 1% localizam-se no nível inóspito 1. Deste modo, em um primeiro momento, anterior à pesquisa de disjunções na distribuição, os seis níveis desde o ótimo 1 até o sub-ótimo 2 foram rotulados no mapeamento de distribuição como hábitat potencial (fig. 6.19). Cabe notar que a soma destes seis níveis produziu resultado correspondente ao gerado pelo corte segundo o limiar que maximiza sensibilidade e especificidade.

Figura 6.19. Mapa de favorabilidade do hábitat para *Leontopithecus caissara*.

770000 780000 790000 800000

7220000 7210000 7200000 7190000 7180000

SP

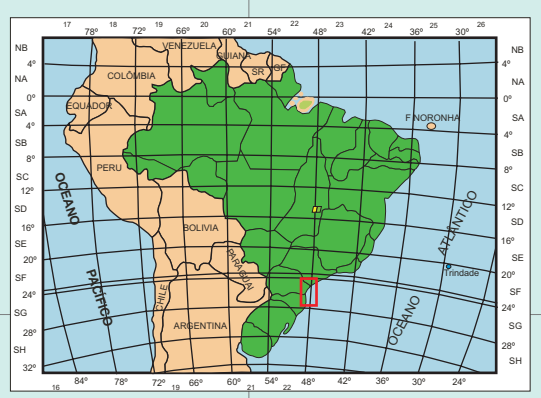
PR

Ilha do Cardoso

Ilha de Superagüi

Ilha das Peças

Baía de Paranaguá



Legenda

- Ótimo 1
- Ótimo 2
- Ótimo 3
- Ótimo 4
- Sub-ótimo 1
- Sub-ótimo 2
- Inóspito 1
- Inóspito 2
- Superfície Líquida
- Limite Estadual

N W E S

Sistema de Projeção Cartográfica: UTM
Elipsóide: SAD69
Datum: SAD69

0 5.000 10.000 m

Título

Mapa de Favorabilidade do Hábitat para *Leontopithecus caissara*

Instituição

Programa de Pós-Graduação em Geografia
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Sistema

VistaSAGA - UFRJ
Sistema de Análise Geo-Ambiental

Autor(a)

Maria Lucia Lorini

Apoio

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CAPES
BR PETROBRAS

Tabela 6.8. Resultados da assinatura ambiental dos registros positivos do censo com "playback" sobre o mapa de favorabilidade do hábitat.

classes de favorabilidade ambietal	***(%) área***
ótimo 1	15.46
ótimo 2	29.08
ótimo 3	14.51
ótimo 4	23.01
	82.06
sub-ótimo 1	8.70
sub-ótimo 2	8.16
	16.86
inóspito 1	1.08
inóspito 2	0
	1.08
total	***100***

6.6.4. CARACTERIZAÇÃO DO HÁBITAT NOS LOCAIS DE REGISTRO DE *L. CAISSARA*

O resultado das assinaturas ambientais dos registros de ocorrência de *L. caissara* oriundos do censo por "playback" sobre todas as variáveis descritoras do clima descrevem o perfil bioclimático apresentado na tabela 6.9. Dentro do perfil resultante dos registros da espécie, observa-se que a amplitude de valores apresentada pelas variáveis bioclimáticas corresponde a áreas de maior temperatura e maior pluviosidade, que na região localizam-se nas faixas de terreno mais distantes das encostas e próximas ao mar, coincidindo com a zona de ausência de geadas.

Tabela 6.9. Perfil bioclimático e altimétrico das áreas de presença de *L. caissara* resultantes das assinaturas ambientais dos registros positivos do censo com "playback" sobre as variáveis bioclimáticas.

variável	***média***	***mínima***	***máxima***	***desvio padrão***
altimetria	18.25	9	27	3.2365
temperatura média anual	22.21	21.5	22.6	3.1254
amplitude anual da temperatura	16.36	15.5	16.9	3.5969
amplitude média diária da temperatura	7.98	7.5	8.3	1.8678
sazonalidade da temperatura	28.48	27.21	29.07	0.5428
temperatura média do trimestre mais quente e úmido	25.80	25.1	26.2	3.2471
temperatura média do quarto mais frio e seco	18.56	18.1	18.9	2.2651
temperatura máxima do mês mais quente	30.42	29.6	30.9	3.7229
temperatura mínima do mês mais frio	14.06	13.9	14.2	0.6002
precipitação acumulada anual	2409.26	2276	2479	59.0955
sazonalidade da precipitação	42.29	42	43	0.4527
precipitação do trimestre mais quente e úmido	991.41	945	1017	20.8162
precipitação do trimestre mais frio e seco	316.10	302	324	6.1282
precipitação do mês mais úmido	356.47	327	372	13.1520
precipitação do mês mais seco	88.50	86	91	1.4413

Na tabela 6.9 também pode ser constatado que todos os registros situam-se em áreas de baixa altitude, entre 3 e 27 m (média de 18,25 m), que no terreno correspondem às zonas de declividade mais suave e mais afastadadas das encostas.

A assinatura ambiental destes registros positivos sobre a variável geologia (tab. 6.10) demonstra que a totalidade das categorias figuradas consiste de substratos quaternários costeiros, com uma preponderância da unidade geológica de Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Pleistocênicos (QPpc), tanto em termos de

porcentagem da área total dos registros (69, 30%) quanto em termos de freqüência de ocorrência (80,77%).

Em relação às categorias de vegetação (tab. 6.10), as assinaturas ambientais apontam que mais de 95% das classes registradas correspondem a formações arbóreas altas e médias sobre Espodossolos, com uma destacada predominância da Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico (AAEn), a Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, que totalizou 77,80% da área e ocorreu em 100% dos registros. Esta formação parece corresponder ao tipo de cobertura vegetacional que melhor reúne as condições favoráveis para a sobrevivência do mico-leão-da-cara-preta, tais com as carcterísticas concomitantes de microclima úmido e quente, com grande incidência de luz solar; estrutura arbórea média superior a 6m, que é a altura mínima do substrato de maior utilização pela espécie (PRADO, 1999); grande ocorrência das árvores de *Tapirira guianennsis*, *Calophyllum brasiliensis* e *Syagrus romanzoffiana*, que são as maiores fornecedoras dos itens alimentares mais consumidos e dos ocos de abrigos (ver Capítulo 4 e PRADO, 1999).

O conjunto destes resultados indica que o padrão de ocorrência de *Leontopithecus caissara* corresponde a um perfil de especialista de hábitat, relacionado a sistemas arbóreos do quaternário costeiro.

Tabela 6.10. Resultados das assinaturas ambientais dos registros positivos do censo com "playback" sobre as variáveis vegetação e geologia.

classes de geologia	***(%) freqüência***	***(%) área***
QPpc - Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Pleistocênicos	80.77	69.30
QHpc - Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Holocênicos	19.23	24.29
QHpe - Planícies paleoestuarinas	30.77	6.41
classes de vegetação	***(%) freqüência***	***(%) área***
AAEn - Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico	100	77.80
AAEh/O - Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo	19.23	1.89
AMEn - Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo)*	42.31	11.74
AMEh/O - Formação Arbórea Média sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo hidromórfico ou Organossolo; Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico e Formação Arbórea Média sobre Espodossolo não-hidromórfico)*	61.54	6.48
AMG/NF/Cg - Formação Arbórea Média sobre Gleissolo, Neossolo Flúvico ou Cambissolo gleico *(legenda mista com presença de Formação Arbórea Baixa secundária intermediária; Formação Arbórea Média secundária intermediária e Formação Arbórea Alta sobre Cambissolo)*	7.69	0.27
AMS - Formação Arbórea Média secundária intermediária	23.08	1.82

6.6.5. PESQUISA DE DISJUNÇÕES NA DISTRIBUIÇÃO

A partir dos resultados do mapeamento do hábitat potencial de *L. caissara*, foram identificadas áreas com potencial para a ocorrência da espécie, desconectadas da área identificada na primeira fase dos inventários de campo. Nestas áreas, que se localizaram nos municípios de Cananéia-SP e Paranaguá-PR (ver figuras 6.18 e 6.11), a presença do

mico-leão-da-cara-preta foi investigada por meio de novas entrevistas e de varreduras com auxílio de "playback".

Ao final destas investigações, nenhum registro positivo foi adicionado ao conjunto previamente reunido na primeira fase dos inventários.

Estes resultados indicam não haver áreas de distribuição disjunta para *Leontopithecus caissara*, permitindo corroborar a distribuição geográfica esboçada em Lorini e Persson (1994), cuja configuração compreende as regiões da Ilha de Superagüi e de duas porções continentais adjacentes, nos municípios de Guaraqueçaba/PR (planície dos rios Patos e Branco) e Cananéia/SP (planície do Ariri).

Do mesmo modo, estes resultados concordam com aqueles apresentados em Prado *et al*. (2003) no sentido de refutar a idéia de que a distribuição continental da espécie no estado de São Paulo estende-se até a região da Serra do Cordeiro, município de Cananéia (ver figura 6.10), conforme proposto por Marstuscelli e Rodrigues (1992) e Rodrigues (1998, *apud* PRADO *et al*., 2003).

6.6.6. DELIMITAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE *L. CAISSARA*

De acordo com as diretivas da União para a Conservação da Natureza para estudos envolvendo espécies ameaçadas de extinção, a área de distribuição geográfica foi aqui estimada através da obtenção da extensão de ocorrência e da área de ocupação da espécie alvo.

6.6.6.1. Extensão de ocorrência

A extensão de ocorrência de *Leontopithecus caissara*, obtida pela planimetria do polígono convexo mínimo ("convex hull") traçado em torno de todos os registros de ocorrência da espécie (fig. 6.20), totalizou 23781,15 ha ou 237,8115 km^2. Tal estimativa de extensão geográfica certamente representa uma das menores áreas de distribuição geográfica já registradas para espécies de mamíferos e aves.

Este resultado configura um padrão de distribuição geográfica muito restrita, indicando um alto grau de endemismo, relacionado a sistemas arbóreos do quaternário costeiro entre o norte do Paraná e o sul de São Paulo.

6.6.6.2. Área de ocupação

A primeira estratégia utilizada para estimar a área de ocupação da espécie alvo, empregando a abordagem mais simplificada de contagem de células em uma grade de 2 x 2km sobreposta à extensão de ocorrência (fig. 6.21), resultou em um total de 44 células ocupadas, correspondendo a uma área de ocupação de 176 km^2.

Na segunda estratégia empregada, a área de ocupação da espécie alvo foi obtida através da sobreposição do mapa de hábitat potencialmente disponível, resultante da modelagem com Maxent, com o mapa da extensão de ocorrência. A partir desta abordagem mais refinada derivou-se o mapeamento da área de ocupação da espécie (figuras 6.22 e 6.23), cuja planimetria resultou as seguintes somatórias:

- *Situação conservadora*: incluindo quatro níveis de favorabilidade do hábitat (ótimo 1 a 4), a área de ocupação totaliza *5014,98 ha* ou *50,1498 km^2*. Nesta situação são

considerados apenas os níveis de ótimo, que correspondem a 82,06% das presenças registradas da espécie.

- *Situação otimista*: incluindo seis níveis de favorabilidade do hábitat (ótimo 1 a 4, mais sub-ótimo 1 a 2), a área de ocupação totaliza *10047,51 ha* ou *100,4751 km²*. Esta situação já é mais abrangente e considera também os níveis de sub-ótimo, os quais figuram em 16,86% das presenças registradas da espécie.
- *Situação extremamente otimista*: incluindo sete níveis de favorabilidade do hábitat (ótimo 1 a 4, mais sub-ótimo 1 a 2 e inóspito 1), a área de ocupação totaliza *17433,54 ha* ou *174,3354 km²*. Este quadro consiste na situação mais abrangente possível, considerando inclusive o nível inóspito, que compõe apenas 1,08% das presenças registradas da espécie.

De acordo com as recentes diretrizes da IUCN (2006), a área de hábitat disponível obtida via modelagem não deveria ser utilizada para computar diretamente a àrea de ocupação de uma espécie, uma vez que esta produziria estimativas sobrestimadas. Por esta razão, o procedimento ali indicado é assumir a contagem das células ocupadas na grade de 2 x 2km. Contudo, ao contrário do que afirmam as diretrizes da IUCN (2006), os resultados obtidos para a área de ocupação de *L. caissara*, segundo as duas estratégias adotadas neste estudo, demonstraram que o método da contagem de quadrados de 2 x 2km foi o que produziu uma estimativa sobrestimada. A metodologia baseada no hábitat modelado demonstrou ser maior flexibilidade e performance, fornecendo as menores estimativas de área de ocupação, além de delimitações espaciais mais refinadas, o que permite um melhor entendimento da estrutura espacial da distribuição geográfica da espécie.

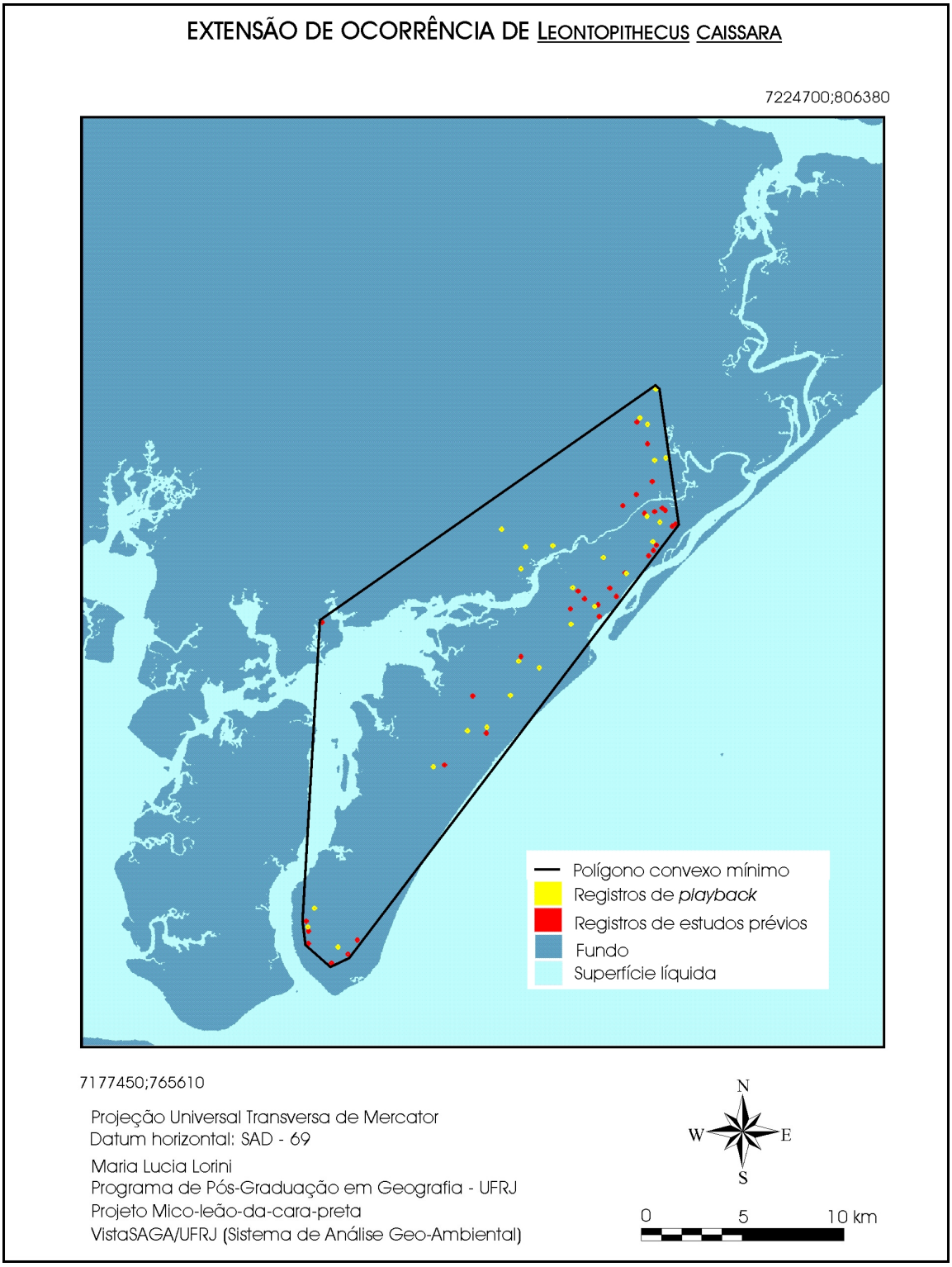


Figura 6.20. Delimitação da extensão de ocorrência de *L. caissara*.

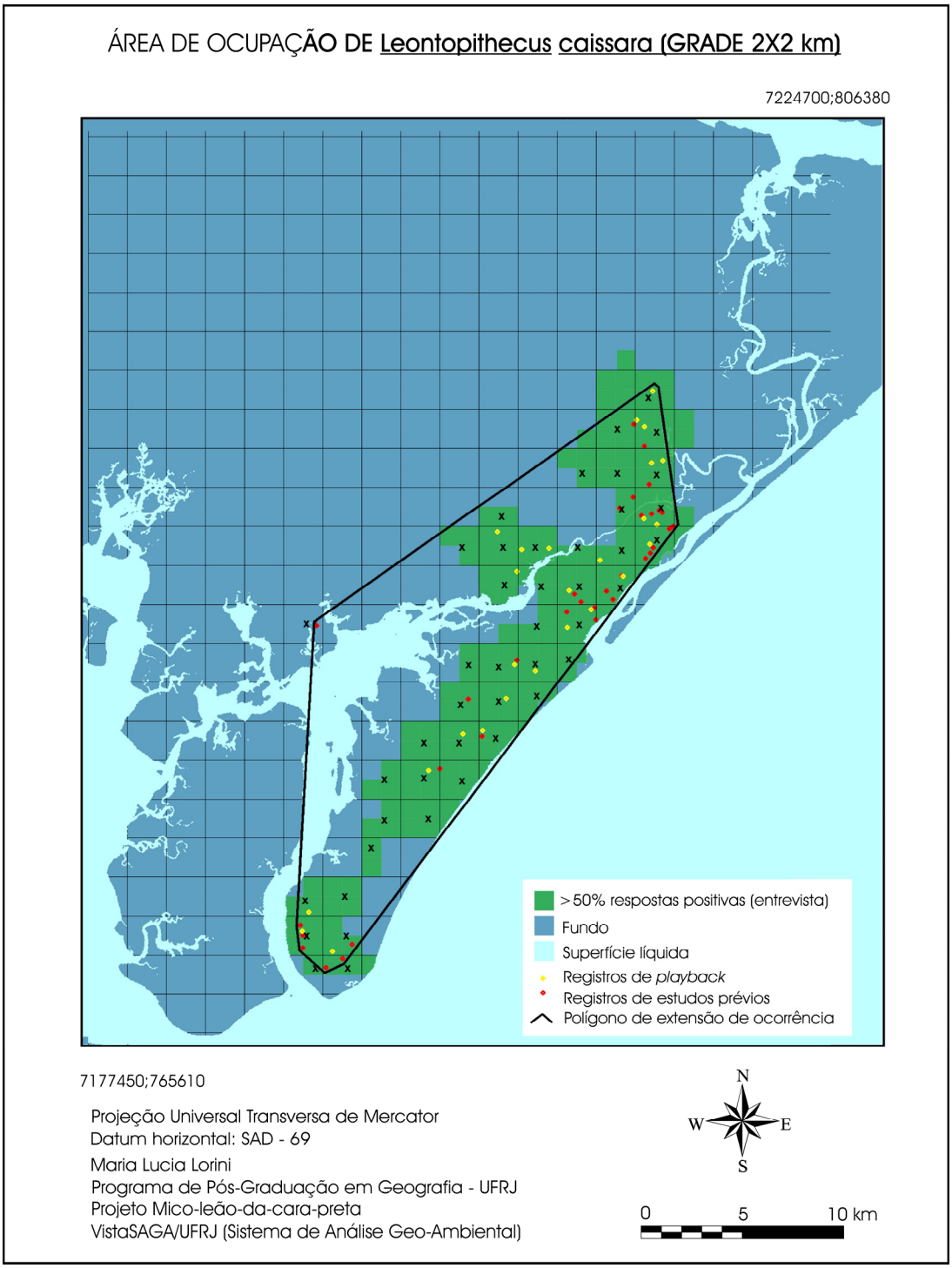


Figura 6.21. Delimitação da área de ocupação de *L. caissara* via contagem de células ocupadas em uma grade de 2 x 2km sobre a extensão de ocorrência da espécie.

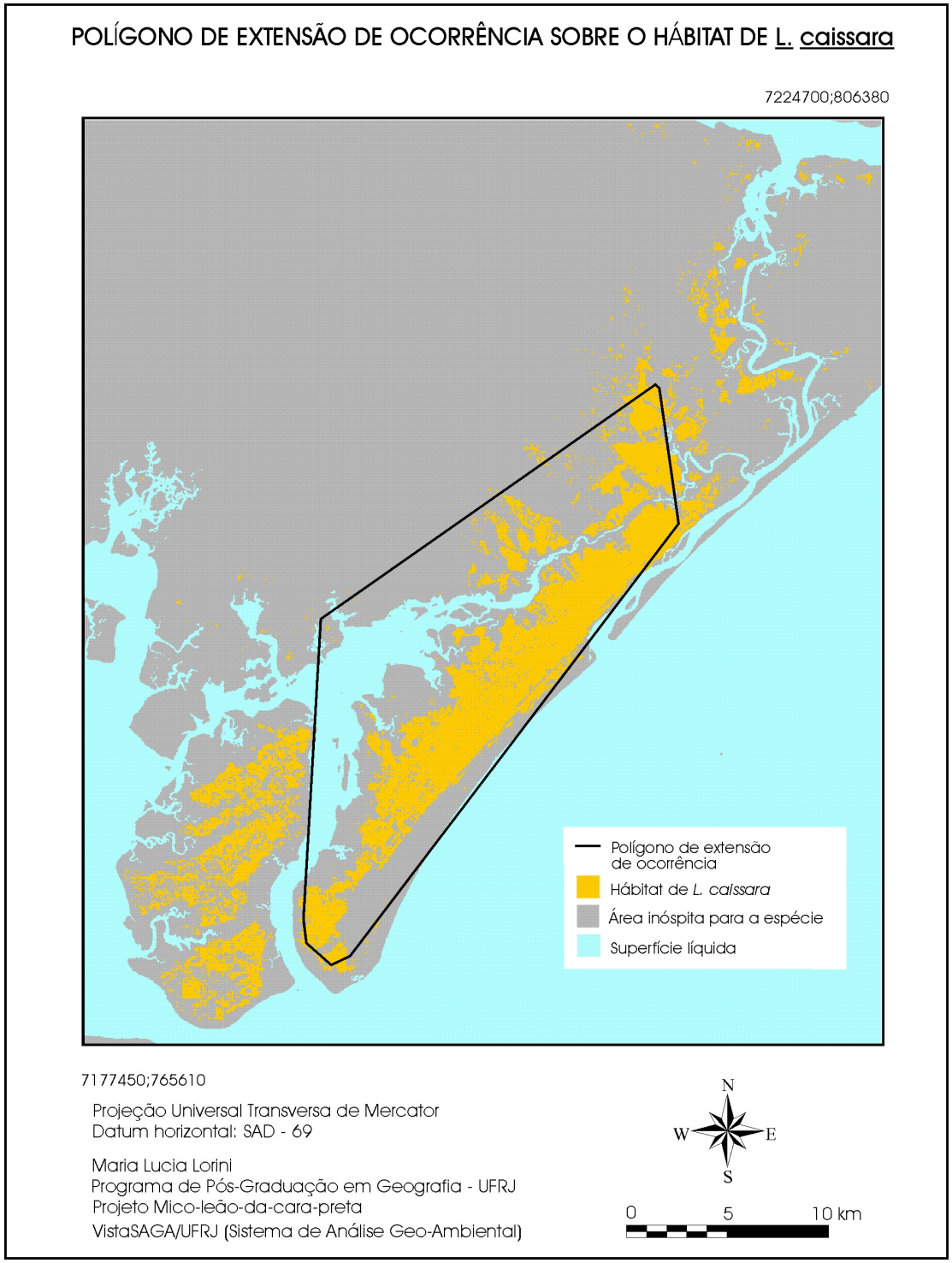


Figura 6.22. Sobreposição do polígono da extensão de ocorrência de *L. caissara* sobre o hábitat potencial da espécie.

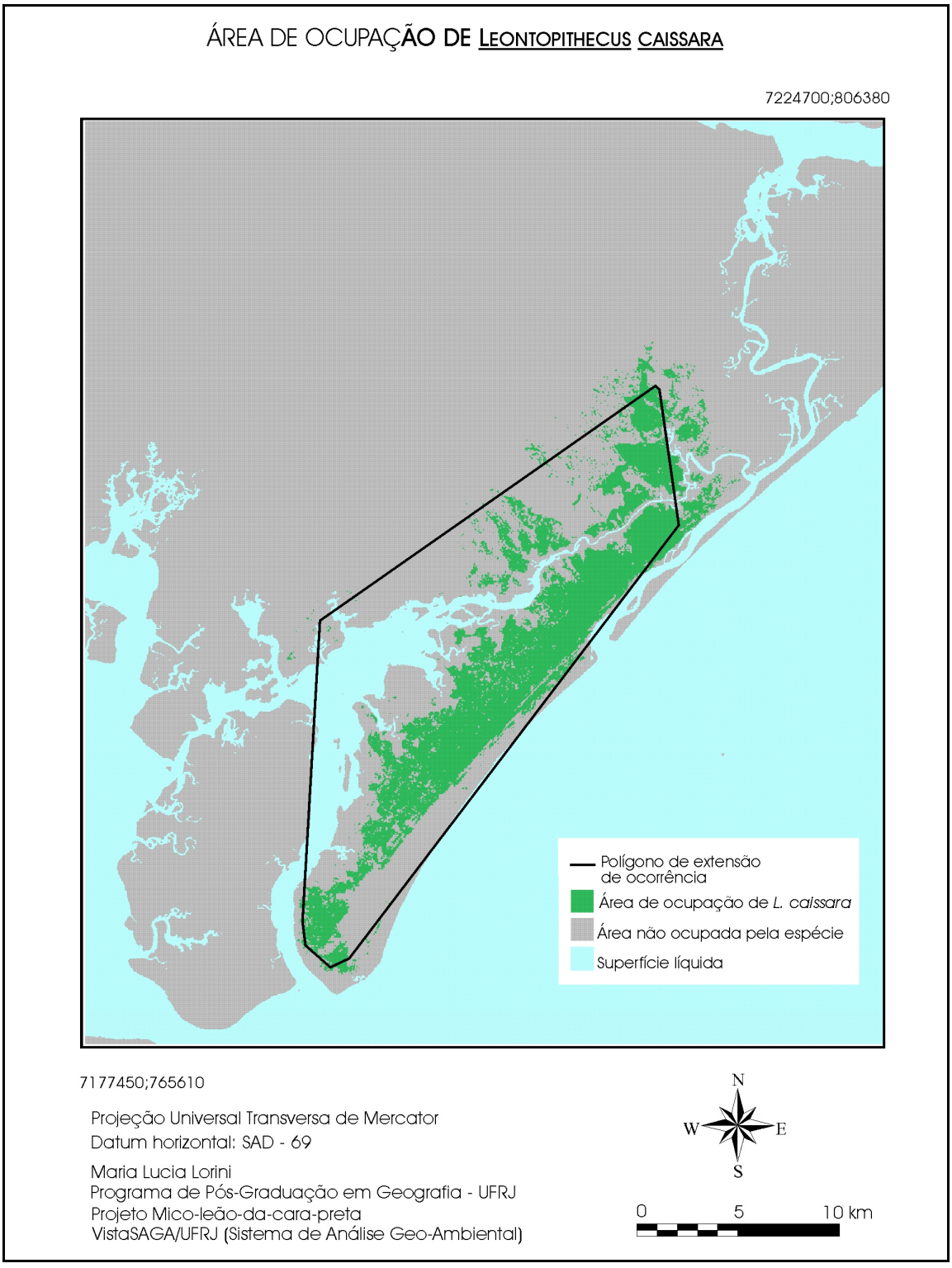


Figura 6.23. Delimitação da área de ocupação de *L. caissara* via obtenção da àrea de hábitat modelado existente na extensão de ocorrência da espécie.

Cumpre ressaltar que, em qualquer das estimativas e situações consideradas, os resultados indicam que *L. caissara* apresenta uma área de ocupação diminuta, reforçando o padrão de forte endemismo desta espécie.

6.6.7. ANÁLISE DA ESTRUTURA DO HÁBITAT PARA AS POPULAÇÕES DE *L. CAISSARA*

Conforme descrito na seção de materiais e métodos, no primeiro passo da modelagem de conectividade/fragmentação foi realizado o reconhecimento das manchas das populações, que consistiu no cômputo da distância efetiva ou distância custo a partir da área de ocupação, calculada sobre a superfície de atrito ambiental (fig. 6.24). O resultado destes procedimentos de reconhecimento de manchas delimitou três distintos eco-campos de população, correspondendo às manchas (ou localidades) das populações, que foram assim denominadas (fig. 6.25): *Superagüi* (município de Guaraqueçaba/PR), *Ariri* (município de Cananéia/SP) e *Patos-Branco* (município de Guaraqueçaba/PR).

Na segunda etapa da modelagem de conectividade/fragmentação do hábitat o cruzamento do modelo de favorabilidade ambiental com o mapa de localidades (áreas) das populações resultou no mapa de favorabilidade de hábitat para as populações (fig. 6.26), cuja planimetria permitiu analisar a qualidade e o grau de fragmentação interna das manchas.

Os resultados destas planimetrias podem ser observados na tabelas 6.11 e 6.12, que mostram a situação das populações com respeito à área disponível em cada nível de favorabilidade do hábitat, totalizadas em três situações de inclusão desde a mais conservadora até a extremamente otimista.

Considerando a situação mais conservadora, mais aconselhável para situações envolvendo espécies ameaçadas de extinção, os resultados indicam que a maior população é a de Superagüi, cuja área disponível soma 3918,42 ha. As duas populações continentais são bem menores, sendo que a do Ariri totaliza 778,14 ha de área disponível e a do Patos-Branco soma 318,42 ha, representando, respectivamente, 15,52% e 6,35% do total disponível para a espécie.

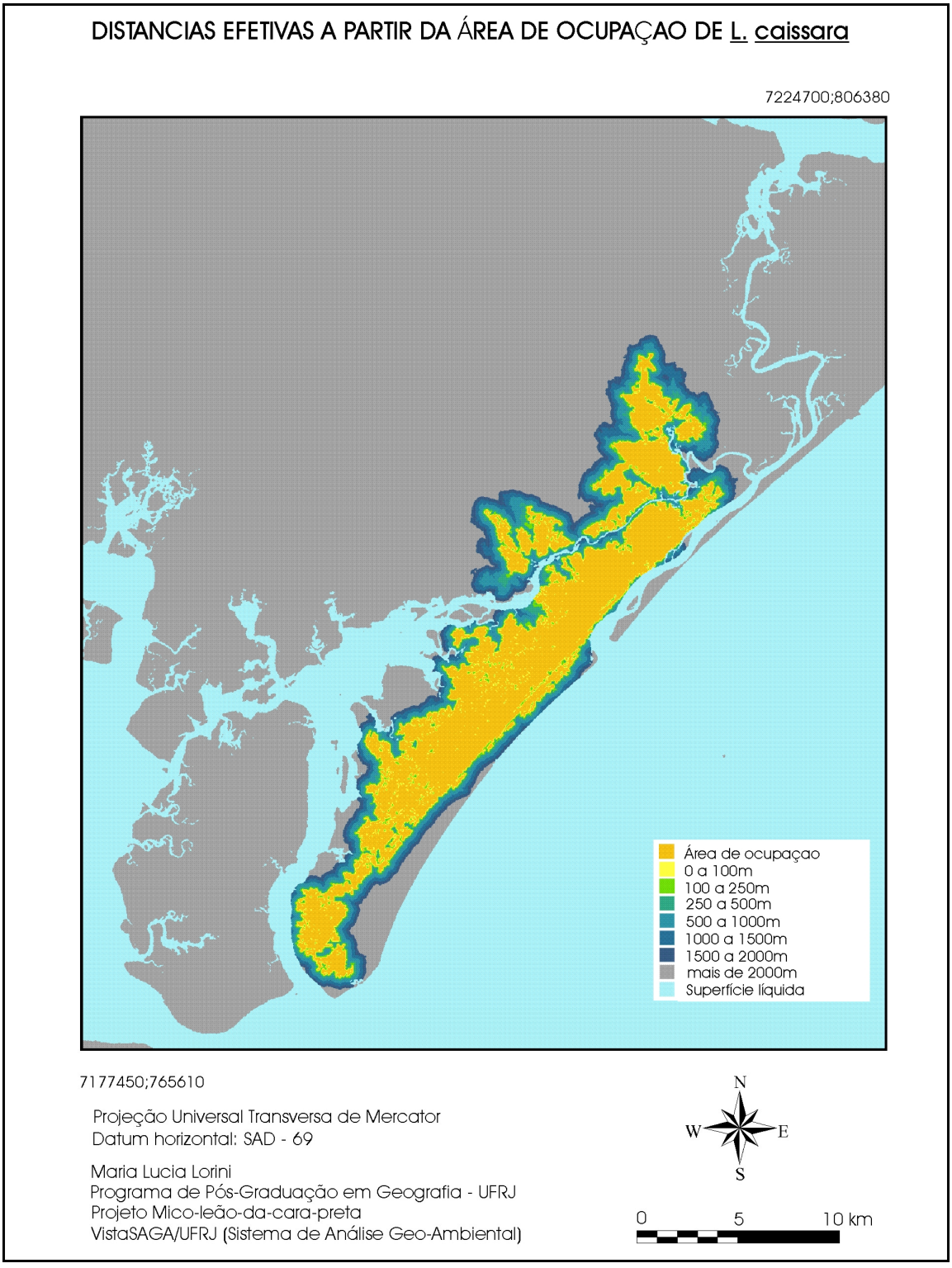


Figura 6.24. Mapa das distâncias efetivas a partir da área de ocupação de *L. caissara*.

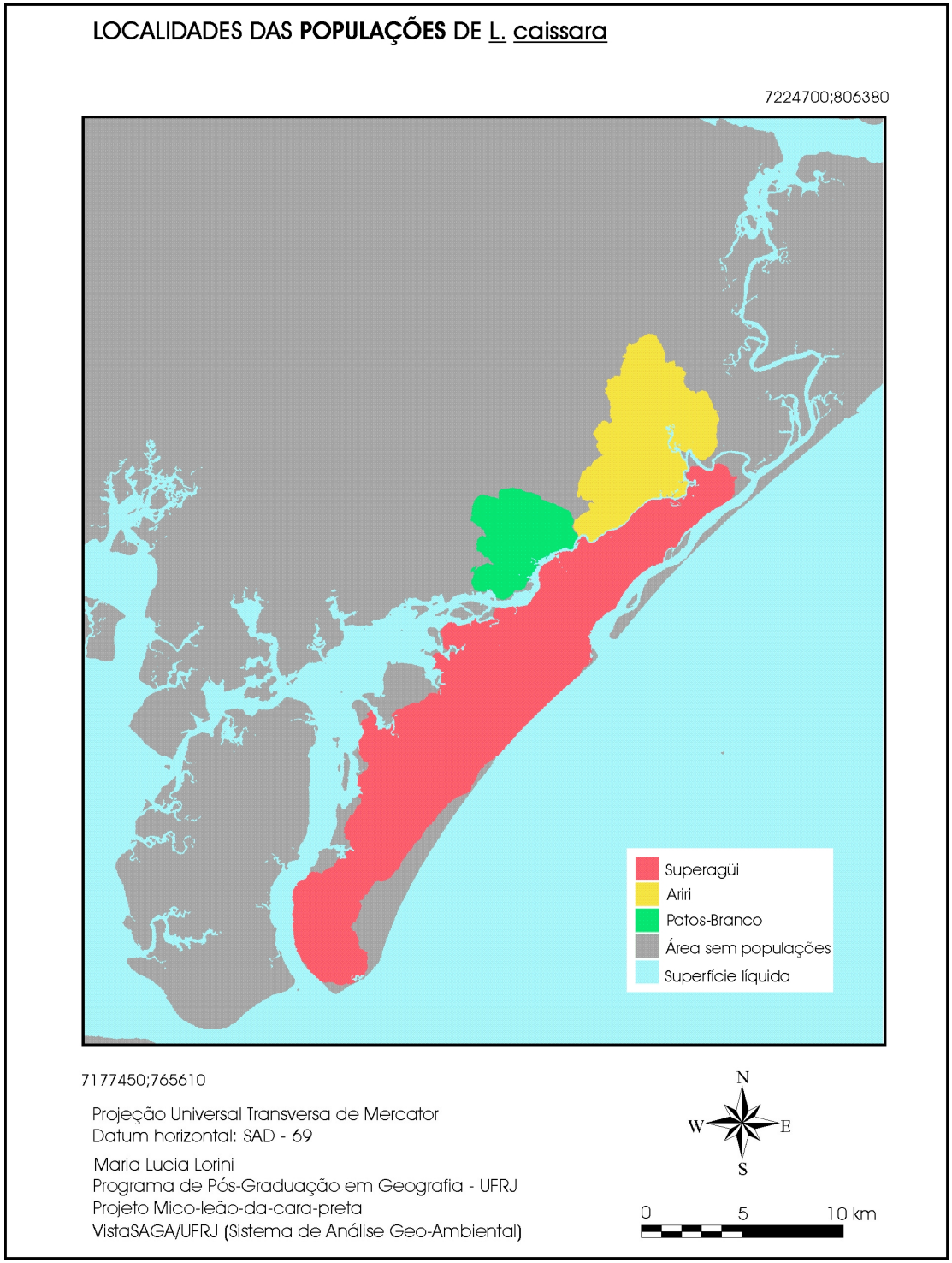


Figura 6.25. Mapa de localidades das populações de *L. caissara*.

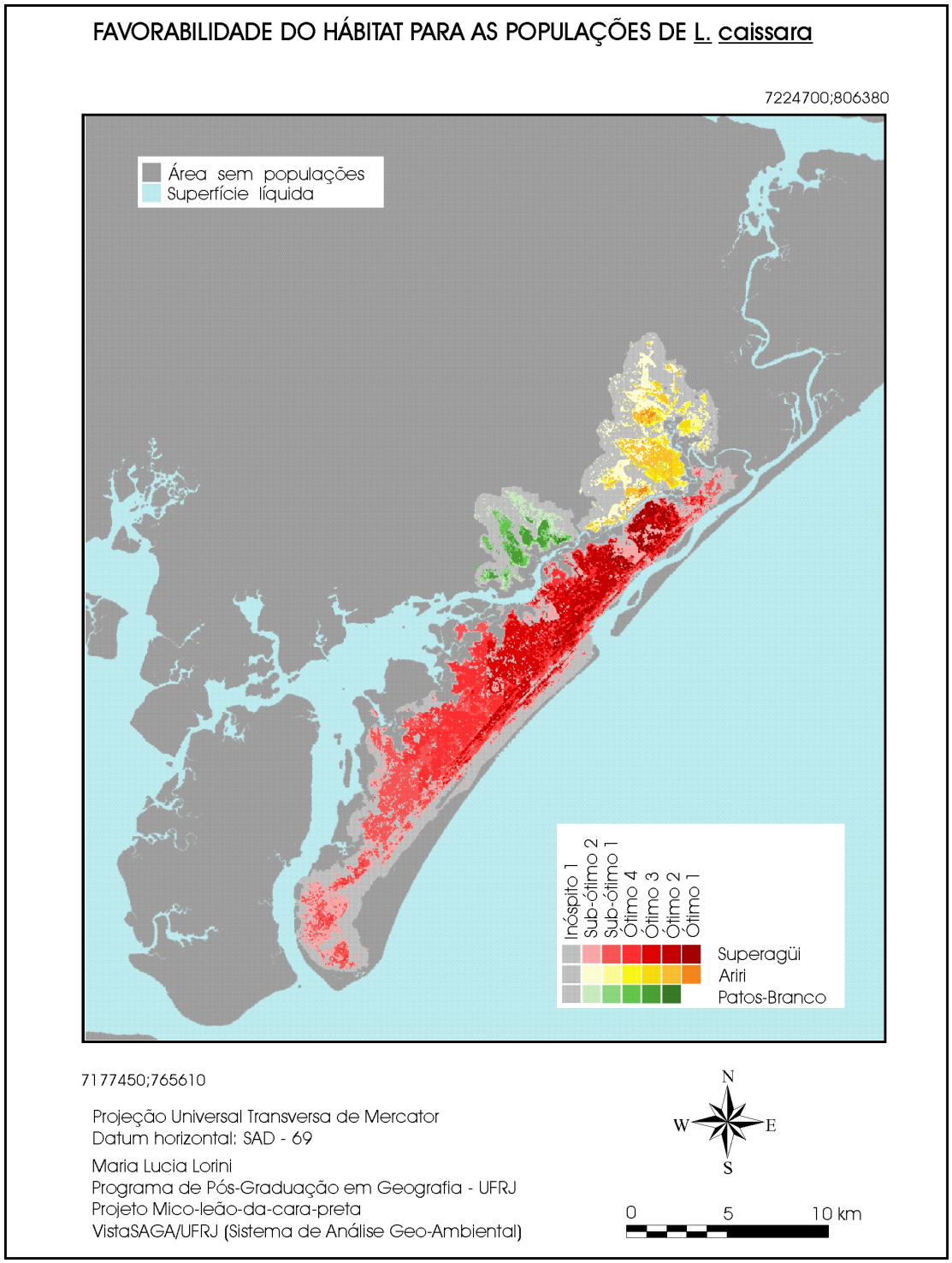


Figura 6.26. Mapa de favorabilidade do hábitat para as populações de *L. caissara*.

Tabela 6.11. Planimetria das localidades das populações sobre o mapa de favorabilidade do ambiente para *L. caissara*.

	Superagüi		**Ariri**		**Patos-Branco**	
classes de favorabilidade ambietal	***área (ha)***	***% área***	***área (ha)***	***% área***	***área (ha)***	***% área***
ótimo 1	358.56	3.08	44.64	1.11	0.00	0.00
ótimo 2	826.11	7.09	369.45	9.20	7.11	0.40
ótimo 3	1006.83	8.64	219.60	5.47	177.03	10.03
ótimo 4	1726.92	14.82	144.45	3.60	134.28	7.61
sub-ótimo 1	2174.31	18.66	274.41	6.83	93.33	5.29
sub-ótimo 2	1528.20	13.12	722.79	17.99	239.49	13.56
inóspito 1	4029.66	34.59	2242.08	55.80	1114.29	63.11
total	***11650.59***	***100***	***4017.42***	***100***	***1765.53***	***100***

Tabela 6.12. Planimetria das áreas das populações com respeito ao nível de favorabilidade do hábitat para *L. caissara*.

populações	***área (ha)***	***% área***
incluindo os 7 níveis (ótimo 1 a inóspito 1)		
Superagüi	11650.59	66.83
Ariri	4017.42	23.04
Patos-Branco	1765.53	10.13
total	***17433.54***	***100***
incluindo 6 níveis (ótimo 1 a sub-ótimo 2)		
Superagüi	7620.93	75.85
Ariri	1775.34	17.67
Patos-Branco	651.24	6.48
total	***10047.51***	***100***
incluindo 4 níveis (ótimo 1 a ótimo 4)		
Superagüi	3918.42	78.13
Ariri	778.14	15.52
Patos-Branco	318.42	6.35
total	***5014.98***	***100***

Os resultados em conjunto apontam uma estrutura de rede populacional composta por três populações, duas continentais (Ariri e Patos-Branco) e uma insular (Superagüi). Todas as populações da rede apresentam área disponível reduzida, pricipalmente a do Patos-Branco, sendo que a maior população, a da Ilha de Superagüi, agrega quase 80% da área total disponível para a espécie. Esta maior população também apresenta o maior grau de isolamento na rede, encontrando-se atualmente separada das populações do continente por um canal de mar, o Canal do Varadouro, que foi aberto em 1951 e resultou na insularização da antiga península de Superagüi. Embora as duas populações continentais (Ariri e Patos-Branco) não se encontrem desconectadas por braços de mar, cabe ressaltar que a possibilidade de migração de indivíduos entre as mesmas configura-se bastante reduzida, já que ambas estão separadas pela ocorrência de áreas inóspitas para a espécie (fig. 6.26). Considerando esta estrutura espacial, para efeito de uma classificação tentativa em alguma categoria de modelo populacional, a configuração do conjunto de populações de *L. caissara* parece mais próxima ao modelo de metapopulação em desequilíbrio ("non-equilibrium metapopulation").

6.6.8. CLASSIFICAÇÃO DO STATUS DE CONSERVAÇÃO DE *L. CAISSARA*

A partir dos resultados das etapas anteriores foi possível estimar os valores necessários para realizar a classificação do status de conservação do mico-leão-da-cara-preta segundo os critérios da IUCN (2001) (tab. 6.13). Para as estimativas de número de indivíduos utilizamos o tamanho médio do "home range" do grupo (255 ha) e o número médio de indíviduos por grupo (5,12) obtidos em campo por radiotelemetria (HOLST *et al*., 2006).

Tabela 6.13. Estimativas necessárias para utilizar a classificação da IUCN (2001), calculadas para três situações distintas com respeito aos níveis de favorabilidade de hábitat incluídos nas computações. * *Níveis ótimo 1 a 4 (presente em 82,06% dos registros da espéice); Sub-ótimo 1 a 2 (presente em 16,86%); Inóspito 1 (presente em 1,08%).*

***Situação conservadora**: inclui quatro níveis (ótimo 1 a 4)**	
extensão de ocorrência (km^2)	237.8
área de ocupação (km^2)	50.1
nº indivíduos	100.9 (101)
nº indivíduos maduros	39.4 (39)
nº indivíduos da maior população	78.8 (79)
nº indivíduos maduros da maior população	30.8 (31)
***Situação otimista**: inclui seis níveis (ótimo 1a 4 + sub-ótimo 1 e 2)**	
extensão de ocorrência (km^2)	237.8
área de ocupação (km^2)	100.5
nº indivíduos	201.7 (202)
nº indivíduos maduros	78.8 (79)
nº indivíduos da maior população	153.1 (153)
nº indivíduos maduros da maior população	59.8 (60)
***Situação extremamente otimista**: inclui sete níveis (ótimo 1 a 4 + sub-ótimo 1 e 2 + inóspito 1)**	
extensão de ocorrência (km^2)	237.8
área de ocupação (km^2)	174.3
nº indivíduos	350.2 (350)
nº indivíduos maduros	128 (128)
nº indivíduos da maior população	249.3 (249)
nº indivíduos maduros da maior população	91.4 (91)

De acordo com as prescrições da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN, 2001), na avaliação do status de conservação de espécies é indicado adotar a abordagem de precaução, que neste caso consiste em aplicar as estimativas computadas na situação conservadora.

Considerando estas estimativas, segundo a classificação da IUCN (2001) *Leontopithecus caissara* apresenta status de conservação global equivalente à categoria *Em Perigo Crítico de Extinção (Critically Endangered - CR)*, com base no critério *CR D*, que consiste em tamanho populacional total estimado em menos de 50 indivíduos maduros.

Analisando as situações otimista e extremamente otimista, o status de conservação global da espécie resulta equivalente à categoria *Em Perigo de Extinção (Endangered -EN)*, de acordo com o critério *EN D*, que corresponde a um tamanho populacional total estimado em menos de 250 indivíduos maduros. Contudo, cumpre destacar que as estimativas de indivíduos maduros nestas duas situações otimistas, embora superior ao limite estabelecido para a categoria Em Perigo Crítico de Extinção (CR), situaram-se bem mais próximas a este limiar do que ao estabelecido para a categoria Em Perigo de Extinção (EN).

Todos estes resultados reforçam a indicação de que *Leontopithecus caissara* enquadra-se na categoria de ameaça Em Perigo Crítico de Extinção (CR), que segundo a IUCN (2001) qualifica a espécie assim classificada como sujeita a um risco extremamente elevado de extinção na natureza.

Neste sentido, um ponto merece comentário sobre o status de conservação de *Leontopithecus caissara*. Muito embora os impactos de ações antrópicas (*e.g*. abertura do Canal do Varadouro; desflorestamento; extrativismo; caça; captura etc.) tenham incidido de forma negativa sobre as populações do mico-leão-da-cara-preta, a condição de extremo risco de extinção enfrentada pela espécie, em boa parte, apresenta base natural. A situação de ameçada associada a *L. caissara* deriva principalmente de sua diminuta distribuição geográfica, a qual, em maior proporção, parece refletir o padrão de forte endemismo e o perfil especialista da espécie, ditados por restrições ambientais naturais. Os recortes da distribuição geográfica do mico-leão-da-cara-preta não apresentam grande congruência

com o padrão de conversão de hábitats para áreas antropizadas observado na região. Estes padrões foram anteriormente demonstrados neste capítulo nos itens referentes à modelagem de distribuição e caracterização do hábitat de *L. caissara*, bem como nos itens relativos à modelagem de distribuição e planimetrias de cobertura do solo para a região entre o norte de SC e sul de SP, os quais foram apresentados no Capítulo 4.

Por fim, no que se refere à abordagem espacialmente explícita adotada, embora nesta parte do estudo a mesma tenha sido demonstrada em uma aplicação para avaliar o status de conservação de espécies segundo a classificação da IUCN, vale ressaltar que este arcabouço constitui uma metodologia muito mais abrangente. De fato, esta abordagem pode embasar Análises de Viabilidade de Populações - AVP ("Population Viability Analysis - PVA"), bem como várias modelagens e simulações incorporando impacto antrópico e/ou ações de recuperação e manejo, análises para seleção de áreas prioritárias para ações de manejo e conservação, entre outras modalidades de apoio à decisão.

6.6.9. ANÁLISE DO STATUS DE PROTEÇÃO DO HÁBITAT DE *L. CAISSARA* E INDICAÇÃO DE ÁREAS PARA AÇÕES DE MANEJO

A realização dos procedimentos de Análise de Lacunas ("Gap Analysis") para a área de extensão de ocorrência de *L. caissara* indicou a existência de um total de 260 manchas de hábitat potencial que não se encontram protegidas pelo sistema de unidades de conservação ("optimal gaps"), uma vez que se localizam fora das zonas destinadas à proteção integral, estando, portanto, sujeitas a impactos antrópicos (fig. 6.27, tab. 6.14).

O conjunto destas áreas não protegidas totaliza 1743,39 hectares (tab. 6.14), sendo que das 260 manchas a grande maioria consiste de 223 pequenas manchas com menos de 1 ha, perfazendo cerca de 4% da área. As demais manchas correspondem a um grupo de 26

cuja área está entre 1 a 5 ha (aproximadamente 3% da área), outras sete apresentam entre 5 e 20 ha (cerca de 5% da área), além de quatro manchas maiores do que 20 ha (cerca de 88% da área), que se encontram identificadas na figura 6.27.

Neste último grupo encontram-se duas áreas maiores do que 100 hectares, as manchas 1 e 2 da figura 6.27, onde se destaca a primeira mancha, com 1356,12 hectares, uma vez que sozinha corresponde a cerca de 78% das áreas favoráveis para *L. caissara* existentes em sua extensão de ocorrência e externas ao zoneamento de proteção integral.

Tabela 6.14. Planimetria das manchas de áreas favoráveis para *L. caissara* e que não se encontram protegidas.

Manchas	***Área (ha)***
Mancha 1	1356.12
Mancha 2	128.61
Mancha 3	29.61
Mancha 4	23.13
Manchas de 10 a 20 ha	59.13
Manchas de 5 a 10 ha	20.88
Manchas de 1 a 5 ha	54.09
Manchas < 1 ha	71.82
Total	***1743.39***

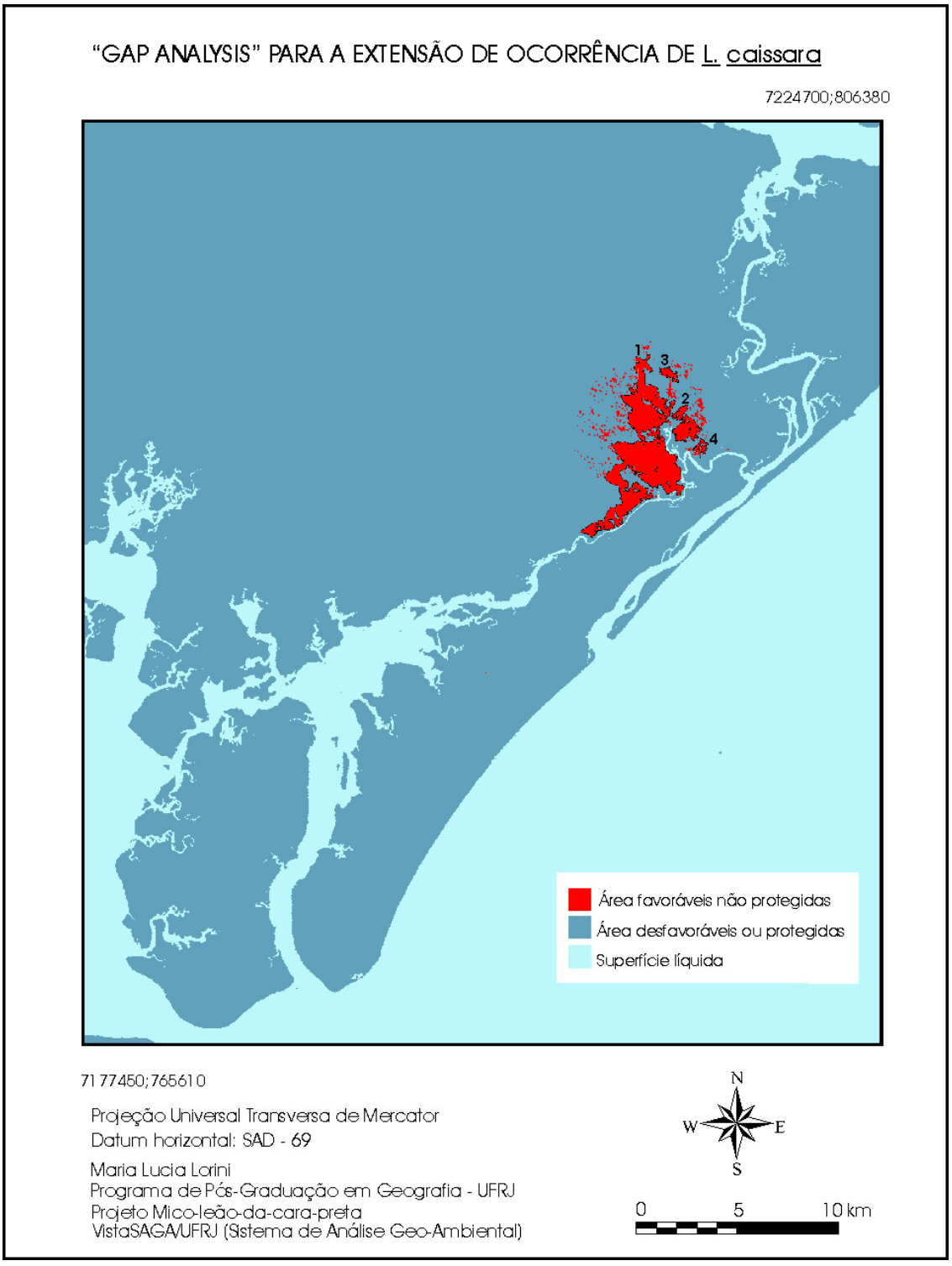


Figura 6.27. Mapa resultante da Análise de Lacunas ("Gap Analysis") mostrando as áreas favoráveis para *L. caissara* que não estão protegidas em unidades de conservação de proteção integral.

6.7. Conclusões do capítulo

Esta seção encerra o capítulo apresentando as conclusões referentes aos resultados obtidos neste estudo de caso, que teve como elemento alvo o mico-leão-da-cara-preta, *Leontopithecus caissara*. Para possibilitar uma melhor avaliação desta pesquisa, a estrutura do texto segue a relação das sete hipóteses levantadas no início do capítulo.

Hipótese 1: Sobre o desempenho de técnicas de modelagem preditiva de distribuição

Na etapa de obtenção das variáveis de ocorrência do elemento biótico alvo, os procedimentos apresentados consistiram em reunião de dados bibliográficos, de registros de museus e de inventários de campo. No caso da ocorrência de *L. caissara,* os métodos descritos para as atividades de campo envolveram a conjugação de um programa de entrevistas dirigido a habitantes locais conhecedores da fauna com um inventário de campo com auxílio de "playback" das vocalizações longas territoriais, associação esta que demonstrou excelentes resultados em termos de custo/benefício.

Já o conjunto de procedimentos descritos para a seleção das variáveis preditoras resultou na criação de planos de informação que representaram cinco conjuntos de variáveis: as descritoras da ocorrência da espécie alvo e as 21 descritoras do ambiente, estas últimas divididas em morfo-geológicas; climáticas; bióticas e antrópicas. O elenco é composto por variáveis de fácil obtenção e mensuração, compatíveis com sistemas padronizados de classificação de vegetação, que foram selecionadas com base em seu potencial para explicar a ocorrência da espécie alvo.

A partir destes conjuntos de variáveis, na fase de avaliação de algoritmos, efetuada com base na estatística AUC, o desempenho da predição resultante de cada um dos quatro modelos utilizados (Maxent, Domain, Bioclim e LDA de Fisher) alcançou valores considerados de bons a excelentes (> 0,8), sendo bem superiores ao de uma predição aleatória (0,5).

Na etapa final de modelagem, todos as predições geradas pelo algoritmo selecionado (Maxent) alcançaram excelente performance, com valores de AUC de teste superiores a 0,96 em todos as escalas e resoluções adotadas e com alta significância estatística ($p<0,0001$).

Estes resultados corroboram a hipótese de que, dado um conjunto de variáveis preditoras e outro de observações de ocorrência, técnicas de modelagem de distribuição podem gerar mapas de hábitat potencial para a espécie alvo com performance superior a uma distribuição gerada ao acaso.

Hipótese 2: *Sobre o desempenho de algoritmos de aprendizagem de máquina para modelagem de distribuição*

A avaliação de desempenho dos algoritmos de modelagem de distribuição demonstrou a maior eficiência do modelo Maxent (AUC = 0,945) em comparação aos algoritmos de envelopes climáticos (Domain = 0,883 e Bioclim = 0,853) e ao algoritmo linear discriminante de Fisher (= 0,845). A performance superior de Maxent foi estatisticamente significativa em relação a todos os outros três algoritmos.

A partir dos resultados obtidos é possível corroborar a hipótese de que modelos de distribuição baseados em algoritmos de aprendizado de máquina pela abordagem de

Máxima Entropia apresentam melhor performance do que os produzidos por algoritmos tradicionais paramétricos como a LDA de Fisher, bem como por modelos de envelopes bioclimáticos.

Além disto, os resultados sugerem que técnicas de inteligência artificial, tais como o aprendizado de máquina em modelos estatísticos como Maxent, podem representar valioso instrumental para modelagem preditiva de distribuição, sobretudo em situações envolvendo interações não-lineares entre variáveis preditoras, conjuntos de dados de ocorrência reduzidos ou formados apenas por registros de presença.

Hipótese 3: *Sobre a importância das variáveis ambientais preditoras na distribuição modelada para a espécie em distintas escalas*

Os experimentos de modelagem utilizando apenas as variavéis climáticas com o método "jacknife" resultaram bastante congruentes nas três escalas analisadas, indicando o descritor de precipitação no período mais seco como a váriavel de maior importância na predição de distribuição da espécie alvo, ao longo das escalas geográficas de bioma, região e paisagem.

Já nos experimentos de modelagem que envolveram todos os conjuntos de variáveis explicativas (climáticas, morfo-geológicas e biótico-antrópicas), os resultados demonstraram haver diferenças entre as predições para as três escalas geográficas analisadas. Na escala macrorregional de bioma a variável de maior importância predição de distribuição de *L. caissara* corresponde ao descritor bioclimático de precipitação do trimestre mais seco. Por outro lado, nas escalas de região e de paisagem a variável de maior importância constitui o decritor biótico-antrópico de cobertura do solo.

Estes resultados corroboram a hipótese de que, com base no padrão dos registros de ocorrência documentados, as variáveis preditoras identificadas como de maior importância diferem segundo a escala de modelagem, sendo que em escala de maior extensão e menor resolução destacam-se variáveis climáticas, enquanto que em escala de maior resolução e menor extensão figuram descritores de paisagem como as variáveis biótico-antrópicas de cobertura do solo.

Hipótese 4: *Sobre a associação do padrão de ocorrência da espécie e de variáveis ambientais*

A análise das assinaturas ambientais dos registros de ocorrência de *L. caissara* demonstrou um perfil associado a hábitats com as seguintes características: zonas de maior temperatura e maior pluviosidade; de baixa altitude; em substratos quaternários costeiros, sobretudo em Terraços e planícies costeiras com cordões litorâneos Pleistocênicos (QPpc); cobertos por formações arbóreas altas e médias sobre Espodossolos, com destaque para a Formação Arbórea Alta sobre Espodossolo não-hidromórfico (AAEn), a Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas.

O conjunto destes resultados permite corroborar a hipótese de que o padrão de ocorrência de *Leontopithecus caissara* corresponde a um perfil de especialista de hábitat, relacionado a sistemas arbóreos do quaternário costeiro.

Hipótese 5: *Sobre a distribuição geográfica e grau de endemismo da espécie*

Os procedimentos desde os inventários de ocorrência do mico-leão-da-cara-preta, da modelagem de distribuição e da pesquisa de populações disjuntas permitiram traçar o

polígono de extensão de ocorrência da espécie, que apresentou uma área de 237,81 km^2. Esta estimativa de extensão geográfica, que constitui uma pequena porção das planícies quaternárias costeiras de apenas dois municípios, Guaraqueçaba (PR) e Cananéia (SP), representando uma das menores áreas de distribuição geográfica conhecidas para espécies de mamíferos e aves.

Este resultado corrobora a hipótese de que a distribuição geográfica de *Leontopithecus caissara* apresenta-se bastante restrita, correspondendo a um alto grau de endemismo associado a sistemas arbóreos quaternários costeiros da região litorânea entre o norte do Paraná e o sul de São Paulo.

Hipótese 6: *Sobre o status de conservação do mico-leão-da-cara-preta*

A partir da modelagem de conectividade/fragmentação, foi possível delimitar três distintos eco-campos de população, correspondendo às manchas (ou localidades) das populações de *Superagüi* (com 3918,4 ha de área disponível), que é a maior, mais isolada e insular, além de duas outras menores e continentais, denominadas de *Ariri* (778,1 ha) e de *Patos-Branco* (318,4 ha).

Os cômputos dos parâmetros utilizados na classificação da IUCN, efetuados desde uma situação conservadora até uma extremamente otimista, indicaram que *L. caissara* apresenta reduzida extensão de ocorrência (237,8 km^2), diminuta área de ocupação (50,1 - 174,3 km^2) e baixos contingentes populacionais: nº total de indivíduos (101 - 350), nº total de indivíduos maduros (40 - 128), nº de indivíduos da maior população (79 - 249), nº de indivíduos maduros da maior população (31 - 91).

Conforme recomendado pelas diretrizes da classificação da IUCN (2001), considerando os resultados destas estimativas na situação conservadora, é possível corroborar a hipótese de que *Leontopithecus caissara* apresenta status de conservação global equivalente à categoria *Em Perigo Crítico de Extinção (Critically Endangered - CR)*, com base no critério *CR D*, que consiste em tamanho populacional total estimado em menos de 50 indivíduos maduros.

Hipótese 7: Sobre a eficácia da abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação

Os procedimentos de construção da base de dados geocodificados em ambiente de Sistema Geográfico de Informação (SGI) resultaram na elaboração de um modelo digital do ambiente de natureza multiescalar e composto por planos de informação, os quais permitiram descrever a heterogeneidade e a complexidade do ambiente do elemento alvo nos recortes geográficos em análise.

Na configuração implementada para a base de dados geocodificada, os três Bancos de Dados Geográficos (BDGs) conjugados e estruturados hierarquicamente permitiram operacionalizar a abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas (DHM) na estratégia da "escada escalar".

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo demonstram que o arcabouço DHM/SGI possibilitou que a distribuição e o status de conservação de *Leontopithecus caissara* fossem analisados e modelados de forma espacialmente explícita, segundo os conceitos das entidades de eco-campos de indivíduo, de população, de redes de populações (ou metapopulação) e de espécie.

No arcabouço hierárquico multiescalar desenvolvido, que partindo do *pixel* permitiu a agregação para o eco-campo de indivíduo e deste para os demais até o de espécie, foi possível a passagem de escala desde o nível local dos levantamentos de campo e de variáveis em resoluções espaciais de maior detalhe, até o nível global do Domínio da Mata Atlântica em resoluções de 1 km.

A estrutura implementada permitiu também que o acoplamento e a avaliação de algoritmos de inteligência artificial e ecoinformática, como os modelos estatísticos de aprendizado de máquina de Máxima Entropia, na modelagem de distribuição em nível de espécie e populações.

Em resumo, o conjunto destes resultados corrobora a hipótese de que a abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação permitiu transitar nas escalas local (mancha de hábitat), de paisagem (população), de região (redes de populações) e de bioma ou global (espécie *in toto*), em análises de distribuição geográfica e status de conservação do elemento alvo, *Leontopithecus caissara*.

Adicionalmente, a partir dos resultados da implementação desenvolvida é possível concluir que esta abordagem pode embasar diversas análises biogeográficas e genéticas, assim como Análises de Viabilidade de Populações, além de várias modelagens e simulações incorporando impacto antrópico e/ou ações de recuperação e manejo, análises para seleção de áreas prioritárias para ações de manejo e conservação, entre outras modalidades de apoio à decisão. De fato, cabe lembrar que informação do mapeamento de distribuição de *L. caissara* já foi utilizada como apoio à decisão em questões como a ampliação do Parque Nacional de Superagüi para englobar as porções continentais paranaenses da baixada Patos-Branco, bem como da opção por sistema de gerador para fornecimento de energia na Ilha de Superagüi, evitando o desflorestamento que acompanharia o sistema de linha de transmissão.

Capítulo 7

Conclusões e considerações finais

Tudo é loucura ou sonho no início. Nada do que o homem fez no mundo teve início de outra maneira. Mas já tantos sonhos se realizaram, que não temos direito de duvidar de nenhum.

Monteiro Lobato

In my vision of the future of science one's discipline will be noted much as one's place of birth is noted today — where one started on life's journey, but not what totally defines one's life.

Robert Constanza

"The real voyage of discovery consists not in seeking new landscapes, but in having new eyes"

Marcel Proust

Este capítulo encerra a presente tese de doutoramento, relacionando as conclusões gerais e considerações finais do trabalho, estruturadas da maneira listada a seguir. Na seção 7.1. são apresentadas as conclusões relacionadas às hipóteses e objetivos gerais propostos no início do trabalho. A seção 7.2 aponta direções para desenvolvimento de trabalhos futuros. Na seção 7.3 são elencadas possibilidades de aplicações da abordagem desenvolvida. Finalmente, na seção 7.4 são apresentadas as considerações finais da tese.

7.1. Sobre as hipóteses e objetivos gerais

Esta seção apresenta as principais conclusões relacionadas às três hipóteses gerais desta tese, que foram levantadas no Capítulo 1.

Hipótese 1: *A distribuição geográfica de elementos da biodiversidade como ecossistemas, espécies e populações pode ser entendida como um sistema complexo, apresentando portanto configurações de arranjamentos em multiescala e organização em subsistemas hierárquicos.*

No que se refere a padrões de agregação espacial, o resultado da aplicação da metodologia proposta nos dois estudos de caso desta tese (Capítulos 4 e 6), que toma o pixel como unidade espacial mínima de análise, demonstrou que a distribuição dos elementos da biodiversidade apresenta organização em subsistemas hierárquicos.

Em nível de ecossistema (Capítulo 4), a análise da distribuição dos sistemas vegetacionais quaternários costeiros da Mata Atlântica, que partiu de cada pixel individual, demonstrou que a distribuição das manchas de ecótopos e de ecocomplexos de 1ª e 2ª ordem apresenta padrões de agregação e arranjamento multiescala correspondendo a níveis hierárquicos.

No caso dos sistemas vegetacionais arbóreos, a análise de associação espacial indicou que a distribuição de todas as classes de ecótopos e de ecocomplexos apresenta autocorrelação espacial positiva, com valores de I de Moran próximos de 1 (0,98 - 1,06) e alta significância estatística ($p < 0,0001$), o que configura um padrão espacial de atração e de distribuição em aglomerados. Este padrão de organização em agregados espaciais foi demonstrado nos três

níveis hierárquicos (ecótopos, ecocomplexos de 1ª ordem e ecocomplexos de 2ª ordem) e nas três escalas espaciais estudadas.

Do mesmo modo, em nível de espécie e populações (Capítulo 6), a análise da distribuição de *Leontopithecus caissara*, partindo da classificação de cada pixel, demonstrou que também a distribuição das manchas de eco-campos de indivíduo, de população, de metapopulação e de espécie apresenta-se hierarquicamente organizada em agregações, ao longo das escalas local, de paisagem, regional e global.

No que concerne à performance de métodos para a modelagem de distribuição de elementos da biodiversidade, em ambos os estudos de caso, tanto no nível de ecossistema quanto de espécie e população, os modelos que apresentaram melhor desempenho foram aqueles produzidos por algoritmos baseados em aprendizado de máquina.

Em nível de ecossistema (Capítulo 4), a avaliação de desempenho dos algoritmos classificadores de imagens de sensoriamento remoto indicou performance superior para o algoritmo de Rede Neural Artificial, um modelo conexionista não-linear de aprendizagem de máquina, que foi o único a alcançar um valor geral de Kappa considerado excelente (> 0,8). O pior desempenho entre os três algoritmos analisados foi registrado para a Análise Linear Discriminante de Fisher, correspondendo a um Kappa global de 0,63.

Também em nível de espécie e populações, a avaliação de desempenho dos algoritmos de modelagem preditiva de distribuição indicou maior eficiência para um modelo estatístico não-linear de aprendizagem de máquina, o algoritmo de Máxima Entropia (AUC = 0,945). Do mesmo modo, entre os quatro algoritmos analisados, o pior desempenho registrado correspondeu à Análise Linear Discriminante de Fisher (AUC = 0,845).

O conjunto destes resultados permite: (1) rejeitar a hipótese nula de que a distribuição geográfica dos elementos da biodiversidade apresenta um caráter uniforme ou aleatório ao longo de escalas espaço-temporais e de organização biológica.; (2) corroborar a hipótese de

que a distribuição geográfica dos elementos da biodiversidade apresenta-se organizada em agregados, o que foi demonstrado nos três níveis de organização biológica (ecossistema, espécie e população) e nas distintas escalas espaciais estudadas (local, de paisagem, regional e global); (3) corroborar a hipótese de que modelos produzidos com métodos mais flexíveis e/ou não-lineares, baseados em aprendizado de máquina, apresentam melhor performance na modelagem de distribuição de elementos da biodiversidade.

Em resumo, estes resultados permitem corroborar a hipótese de que a distribuição geográfica de elementos da biodiversidade como ecossistemas, espécies e populações pode ser entendida como um sistema complexo, com arranjamentos em multiescala e organização em subsistemas hierárquicos.

Hipótese 2: *A distribuição geográfica de elementos da biodiversidade de sistemas quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica reflete efeitos de mudanças climáticas e de nível do mar ocorridas sobretudo desde o Holoceno Médio.*

Esta hipótese foi investigada no Capítulo 5, que enfatizou o tratamento das escalas temporais em nível de ecossistema, no estudo de caso dos sistemas quaternários do litoral brasileiro.

Os esboços de evolução paleogeográfica dos ambientes quaternários costeiros desenvolvidos para as planícies de Superagüi e Itapoá, que em boa medida representam a situação encontrada na região, indicaram que a configuração atual das planícies costeiras reflete sobretudo as mudanças climáticas e de nível do mar ocorridas nos últimos 7.000 anos, correspondentes aos Estádios V e VII do modelo evolutivo geral de Suguio e Martin (1997). A configuração atual dos terrenos quaternários costeiros analisados define-se a partir do quarto e quinto estádios do esboço desenvolvido (Capítulo 5), no Holoceno Médio,

principalmente após o evento máximo transgressivo holocênico, denominado Trangressão Santos.

Na mesma direção aponta a reconstrução paleoambiental da planície de Itapoá, indicando que também a composição dos sistemas vegetacionais atuais é delineada no quarto e quinto estádios do esboço evolutivo, no Holoceo Médio, sobretudo a partir após o Máximo Transgressivo. Este período corresponde aos Estádios V e VII de Suguio e Martin (1987), bem como aos testemunhos palinológicos da Zona VV-V e VI de Behling e Negrelle (2001). Os registros paleoecológicos e palinológicos sugerem que a área recebeu incursões marinhas até 6.100 A.P., sendo que desde o Holoceno Médio uma densa floresta ombrófila com Myrtaceae, Arecaceae, Moraceae, *Alchornea*, *Myrsine* e *Weinmannia* vem se desenvolvendo no local, havendo os manguezais atingido o pleno desenvolvimento somente em tempos modernos.

A partir destes resultados, corrobora-se a hipótese de que a distribuição geográfica de sistemas vegetacionais atuais dos ambientes quaternários costeiros no domínio da Mata Atlântica apresenta-se correlacionada à configuração de terrenos definida a partir do Holoceno Médio, refletindo os eventos de mudanças climáticas e sendo bastante influenciada por mudanças de nível marinho.

Hipótese 3: *O entendimento da distribuição e permanência de elementos da biodiversidade em paisagens complexas pode ser auxiliado pela utilização de arcabouços integrativos e espacializados de investigação.*

Em ambos os estudos de caso desta tese, a abordagem empregada iniciou pela elaboração da base de dados geocodificados em ambiente de Sistema Geográfico de Informação (SGI), resultando no desenvolvimento de um modelo digital do ambiente, de

natureza multiescalar e composto por planos de informação que permitiram descrever a heterogeneidade e a complexidade ambiental dos recortes geográficos analisados.

No ambiente computacional de ambas as bases de dados geocodificadas, cada uma construída para o desenvolvimento de um estudo de caso, três Bancos de Dados Geográficos (BDGs) foram conjugados e estruturados de maneira hierárquica, o que permitiu operacionalizar a abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas (DHM) na estratégia da "escada escalar".

Os resultados apresentados ao longo desta tese demonstraram que o arcabouço DHM/SGI possibilitou que os elementos alvo em cada um dos estudos de caso fossem analisados e modelados de forma espacialmente explícita, segundo as entidades e a arquitetura de níveis hierárquicos definidas.

No primeiro estudo de caso, tratando dos sistemas arbóreos quaternários costeiros do Brasil Oriental (Capítulo 4), a estratégia DHM/SGI desenvolvida (*pixel* ↔ ecótopo ↔ ecomplexo de 1ª ordem ↔ ecomplexo de 2ª ordem) permitiu a passagem de escala desde o nível local (resoluções espaciais de alto detalhe), de paisagem e de região (norte de SC a sul de SP e resoluções fortes de 30 - 90m), até o nível global do Domínio da Mata Atlântica (resoluções moderadas de 500m).

Também no segundo estudo de caso, que focalizou o mico-leão-da-cara-preta (Capítulo 6), o arcabouço hierárquico multiescalar desenvolvido (*pixel* ↔ eco-campos de indivíduo ↔ de população ↔ de redes de populações ou metapopulação ↔ de espécie) possibilitou a passagem de escala desde o nível local (resoluções espaciais de alto detalhe), de paisagem e de região (norte de SC a sul de SP e resoluções fortes de 30 - 90m), até o nível global do Domínio da Mata Atlântica (resoluções de 1 km).

Ainda em termos de trânsito multiescalar, destaca-se que além de permitir a passagem de escalas de espaço e de níveis de organização biológica, a abordagem espacialmente

explícita desenvolvida nesta tese também possibilitou a passagem de escalas temporais. Esta potencialidade foi concretizada no primeiro estudo de caso através das análises de recortes pretéritos realizadas nos Capítulos 4 e 5, que transitaram, respectivamente, do tempo atual (2002) ao histórico (cenário pré-colonização européia) e do atual ao tempo geológico (Pleistoceno).

Em relação à capacidade integrativa da abordagem DHM/SGI, ficou demonstrado nos dois estudos de caso que a mesma representou uma eficiente via de integração para diversificados métodos e técnicas computacionais, incluindo novas metodologias de modelagem de biodiversidade. Esta estrutura permitiu o acoplamento e a avaliação de algoritmos baseados em aprendizado de máquina, tanto na modelagem de distribuição em nível de ecossistema como em nível de espécie e populações, com a utilização, respectivamente, de modelos conexionistas de Redes Neurais Artificiais (Capítulo 4) e de modelos estatísticos de Máxima Entropia (Capítulo 6).

Os resultados acima destacados permitem corroborar as hipóteses de que: (1) a abordagem da Dinâmica Hierárquica de Manchas em Sistema Geográfico de Informação permite a integração e passagem de escala espacial, temporal e organizacional em análises de distribuição e status de conservação de elementos da biodiversidade; (2) este tipo de abordagem facilita a integração de novos métodos e técnicas de Inteligência Artificial, Geocomputação e Ecoinformática em análises de distribuição de elementos da biodiversidade.

Em suma, este conjunto de resultados permite corroborar a hipótese de que a adoção de arcabouços integrativos e espacializados de investigação pode ser de grande auxílio para o entendimento da distribuição e permanência de elementos da biodiversidade em paisagens complexas.

Por fim, cumpre retomar que a presente tese teve como objetivo geral *desenvolver um arcabouço metodológico integrativo, espacialmente explícito, hierárquico e multiescalar para análises de padrões e processos que configuram a distribuição e a persistência de ecossistemas, espécies e populações em paisagens heterogêneas*. Partindo das demonstrações dos resultados e conclusões derivados deste trabalho de doutoramento, parece lícito considerar que este objetivo geral foi alcançado.

7.2. Sobre os desenvolvimentos futuros

A partir dos trabalhos desenvolvidos nesta tese, vários desdobramentos, refinamentos e extensões podem ser explorados em trabalhos futuros. Algumas idéias que poderiam ser implementadas no futuro são apresentadas a seguir, relacionadas a diferentes temáticas tratadas nesta tese:

Sensoriamento remoto e mapeamento de sistemas vegetacionais quaternários

- Utilização de imagens de múltiplos sensores para melhorar a resolução espectral e espacial, incluindo sensores hiperespectrais (*e.g.* MERIS, ASTER), de radar, de grande resolução espacial (*e.g*. IKONOS, QuickBird), inclusive com o emprego de fusão de imagens.
- Avaliação de novos classificadores baseados em aprendizado de máquina, tais como novos algoritmos de Redes Neurais Artificiais (*e.g.* Self-Organizing Map - SOM, Fuzzy ARTMAP) e de Árvores de Decisão.
- Avaliação de novas técnicas de segmentação e classificação de imagens em abordagem orientada a objetos (*e.g.* GEographic Object-Based Image Analysis - GEOBIA)

Modelagem preditiva de sistemas vegetacionais quaternários costeiros

- Elaboração de modelos preditivos de distribuição de sistemas vegetacionais com base em variáveis ambientais e algoritmos de aprendizado de máquina (*e.g.* RNAs, Maxent, Máquinas de Vetores Suporte, BRT, randomForest, MARS) para possibilitar a construção de cenários pretéritos e futuros de distribuição de vegetação.
- Desenvolvimento de modelagem de distribuição em abordagem de *ensemble* de modelos.

Análise de composição de formações arbóreas quaternárias costeiras

- Utilização de dados fitossociológicos e ambientais para analisar diferenças entre sistemas arbóreos quaternários em escalas intra e interregionais.

Modelagem preditiva de distribuição de *Leontopithecus caissara*

- Avaliação de novos algoritmos de modelagem de distribuição (*e.g.* Máquinas de Vetores Suporte, BRT, randomForest, MARS).
- Desenvolvimento de modelagem de distribuição em abordagem de *ensemble* de modelos.
- Modelagem preditiva de distribuição da espécie em cenários pretéritos do LGM e do Holoceno Médio visando investigar impactos de mudanças climáticas e de nível marinho ocorridas no quaternário sobre a distribuição da espécie.
- Modelagem preditiva de distribuição da espécie em cenários futuros de mudança climática e de nível marinho visando investigar possíveis impactos sobre a distribuição da espécie.

Análise da estrutura espacial das populações

- Avaliação de metodologias baseadas em redes e grafos para analisar a estrutura espacial das populações (*e.g.* medidas de conectividade de rede obtidas em aplicações Java como JMatrixNet, em programas que estão sendo desenvolvidos para análises de conectividade em paisagens como o Conefor Sensinode, ou em pacotes de análise panbiogeográfica como Croizat).

Análise de Viabilidade de Populações

- Testagem da acoplagem de programas de Análise de Viabilidade de Populações em arcabouço espacialmente explícito (*e.g.* RAMAS-GIS).

Modelagem dinâmica de mudanças

- Avaliação de metodologias baseadas em Autômatos Celulares e Modelagem de Agentes para investigar a possibilidade de efetuar modelagem preditiva de distribuição de elementos da biodiversidade em séries temporais, em uma abordagem de modelagem dinâmica (*e.g.* através de ambientes como o Dinamica - EGO ou o Idrisi Taiga).

7.3. Sobre as possibilidades de aplicação

A abordagem multiescalar, hierárquica e espacialmente explícita desenvolvida nesta tese representa uma instrumentação heurística que pode vir a contribuir como arcabouço para pesquisa e apoio à decisão em diversas temáticas. Abaixo seguem elencadas algumas destas possibilidades de aplicação.

Biodiversidade

- Mapeamento de elementos nos três níveis de organização biológica: ecossistemas, espécies e populações.
- Monitoramento de elementos da biodiversidade.
- Definição de prioridades de ação para conservação e manejo de espécies e populações e para recuperação de áreas degradadas.
- Indicação de áreas prioritárias para inclusão no sistema de unidades de conservação.
- Análises de viabilidade de hábitat e de populações (AVHP).
- Avaliação do impacto de agentes antrópicos sobre a biodiversidade.

Mudanças globais

- Previsão de impactos de mudanças climáticas e de uso da terra na distribuição e persistência de hábitats, espécies e populações.
- Previsão de impactos de mudanças do nível do mar sobre sistemas bióticos costeiros.

Padrões e processos biogeográficos

- Investigação de fatores determinantes dos limites de distribuição geográfica de espécies.
- Investigação da ligação entre processos populacionais, metapopulacionais e biogeográficos.

- Análises de endemismo e estruturação espaço-temporal de biotas (arcabouço para Panbiogeografia, Biogeografia Cladística, Filogeografia).

Padrões e processos genéticos

- Análises de fluxo gênico, estruturação espacial de populações e variação genética espacial.
- Investigação da ligação entre a variação genética e o arcabouço espacial, desde escalas regionais e continentais (Filogeografia) até escalas de paisagem (Genética de Paisagem).

7.4. Considerações finais

A presente tese desenvolveu-se na interface entre as Ciências Biológicas, as Geociências e as Ciências da Computação. No domínio das Ciências da Geoinformação, este trabalho procurou integrar e operacionalizar de forma harmônica conceitos e noções oriundas da Biogeografia, da Ecologia de Paisagem e da Biologia da Conservação. Ao longo de seu desenvolvimento, buscou a elaboração de vias de integração para transitar entre as escalas de espaço, de tempo e de organização biológica, de maneira a construir um arcabouço que permitisse tratar a natureza complexa dos sistemas analisados. Para tanto, adotou a perspectiva teórica da Dinâmica Hierárquica de Manchas, implementada em ambiente de Sistemas Geográficos de Informação. Esta abordagem atendeu às necessidades de integração de dados muito variados em natureza e formato, bem como de diversos métodos e técnicas avaçados da Geocomputação, da Inteligência Artificial, da Ecoinformática e de modelagem geográfica e ecológica. O arbacouço metodológico desenvolvido pode assim desempenhar a difícil tarefa tarefa de transitar entre distintos domínios de escalas e de campos disciplinares.

Para encerrar, cabe considerar que a principal contribuição desta tese reside nesta abordagem multiescalar e interdisciplinar, que apresenta uma maneira de tratar sistemas da biodiversidade como sistemas espaciais complexos, traduzidos e implementados via algoritmos computacionais.

Tal arcabouço metodológico pode contribuir como via de acesso para um melhor entendimento de como a dinâmica de fatores abióticos, bióticos e antrópicos configura heterogeneidades espaço-temporais nas paisagens. Neste sentido poderia ainda contribuir para elucidar questões tais como: - De que modo as heterogeneidades espaço-temporais afetam a dinâmica da distribuição da biodiversidade em escalas locais, regionais e globais?; - Como a dinâmica de perturbações naturais e antrópicas reflete-se na evolução dos limites geográficos da biodiversidade e na transformação das paisagens?; Quais as implicações para os processos de diferenciação, fragmentacão, extinção e invasão de espécies? Entende-se que este arcabouço integrativo DHM/SGI apresenta-se bastante promissor para uma instrumentação sólida, robusta e flexível para investigar estas questões, para fomentar pesquisa científica interdisciplinar, assim como para fornecer apoio eficaz para decisões de gestão territorial e de manejo e conservação da biodiversidade, sobretudo em paisagens complexas como as que caracterizam o domínio da Mata Atlântica.

Referências Bibliográficas

AB´SABER, A.N. Megageomorfologia do territorio brasileiro. *In*: BAPTISTA DA CUNHA, S.; TEIXEIRA GUERRA, A.J. (orgs.). **Geomorfologia do Brasil.** Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 1998. p. 71-106.

ADAMI, C. **Introduction to artificial life**. New York: Telos/Springer-Verlag, 1998.

AHL, V.; ALLEN, T.F.H. **Hierarchy Theory: a vision, vocabulary, and epistemology**. NewYork: Columbia University Press, 1996.

AKÇAKAYA, H.R. GIS enhances endangered species conservation efforts. **GIS World**, v. 7, n. 11, p. 36-40, 1994.

AKCAKAYA, H.R.; BURGMAN, M.A.; GINZBURG, L.R. **Applied population ecology.** Sunderland, MA: Sinauser Associates, 1999. 280 p.

AKCAKAYA, H.R.; GINZBURG, L.R. Ecological risk analysis for single and multiple populations. *In*: SEITZ, A., LOESCHCKE, V. (eds.). **Species conservation: a population-biological approach**. Basel: Birkhaeuser Verlag, 1991. p. 73-87.

ALLEN, T.F.; HOEKSTRA, T.W. **Towards a unified Ecology**. New York: Columbia University Press, 1992.

ALMEIDA, C.M.; MONTEIRO, A.M.V.; CÂMARA, G. Modelos de Simulação e Prognósticos de Mudanças de Uso do Solo Urbano: Instrumento para o Subsídio de Ações e Políticas Públicas Urbanas. *In*: XI Encontro Nacional da Associação de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejameno Urbano e Regional (ANPUR), 2005, Salvador-BA. **Anais do XI ENA**. Belo Horizonte, MG : Associação Nacional de Planejamento Urbano e Regional - ANPUR, 2005.

ANDERSON, D.E.; GOUDIE, A.S.; PARKER, A.G. A framework for understanding environmental change. *In*: **Global environments through the Quaternary: Exploring Environmental Change**. Oxford: Oxford University Press. (no prelo).

ANDERSON, R.P.; PETERSON, A.T.; GOMEZ-LAVERDE, M. Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice. **Oikos**, v. 98, p. 3–16, 2002.

ANDREWARTHA, H.G. **Introduction to the study of animal populations**. 2ª ed. London: Methuen & Co. Ltd., 1970.

ANGULO, R.J. **Geologia da planície costeira do estado do Paraná.** São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1992. 334 p. Tese. (Doutorado em Geologia).

ANGULO, R.J. Aspectos físicos das dinâmicas de ambientes costeiros, seus usos e conflitos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 10, p. 175-185, 2004.

ANGULO, R.J.; CAMARGO-LESSA, G. The Brazilian sea-level curves: a critical review with emphasis on the curves from the Paranaguá and Cananéia regions. **Marine Geology,** v. 140, n. 1/2, p. 141-166, 1997.

ANGULO, R.J.; LESSA, G.C.; SOUZA, M.C. A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. **Quaternary Science Reviews**, v. 25, p. 486–506, 2006.

ANSELIN, L. Local Indicators of Spatial Association – LISA. **Geographical Analysis,** v. 27, p. 93-115, 1995.

ANSELIN, L. The Moran scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association. *In*: FISCHER, M.; SCHOLTEN, H.; UNWIN, D. (eds.), **Spatial Analytical Perspectives on GIS**. London: Taylor and Francis, 1996. p. 111-125.

ANSELIN, L. Interactive techniques and exploratory spatial data analysis. *In*: LONGLEY, P.A.; GOODCHILD, M.F.; MAGUIRE, D.J.; RHIND, D.W. (eds.). **Geographical Information Systems: principles, techniques, management and applications**. New York: John Wiley, 1999. p. 251–264.

ANSELIN, L. Computing environments for spatial data analysis. **Journal of Geographical Systems**, v. 2, p. 201-225, 2000.ANSELIN, L. **Spacestat – User's Guide**. Urbana, EUA: University of Illinois, 1992. Disponível em <http://www.terraseer.com/ spacestat/docs/V180man.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2002.

ARAÚJO, D.S.D. Vegetation types of sandy coastal plains of tropical Brazil: a first aproximation. *In*: **Coastal Plant Communities of Latin America**. New York: Academic Press, 1992. p. 337-347.

ARAÚJO, M.B.; CABEZA, M.; THUILLER, W.; HANNAH, L.; WILLIAMS, P.H. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. **Global Change Biology**, v. 10, p. 1618–1626, 2004.

ARAÚJO, M.B.; GUISAN, A. Five (or so) challenges for species distribution modelling. **Journal of Biogeography**, v. 33, p. 1677–1688, 2006.

ARAÚJO, M.B.; PEARSON, R.G. Equilibrium of species' distributions with climate. **Ecography**, v. 28, p. 693–695, 2005.

ARAÚJO, M.B.; RAHBEK, C. How does climate change affect biodiversity? **Science**, v. 313, p. 1396–1397, 2006.

ASHBY, W.R. **An introduction to Cybernetics**. London: Chapman and Hall, 1956.

ASSUNÇÃO. **Estatística espacial com aplicações em Epidemiologia, Economia e Sociologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2001. Disponível em: <http://www.est.ufmg.br/ ~assuncao~>. Acesso em: 15 mar. 2003.

ATKINSON, P.M.; TATNALL, A.R.L. Neural networks in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 699-709, 1997.

AUSTIN, M.P.; NICHOLLS, A.O.; DOHERTY, M.D.; MEYERS, J.A. Determining species response functions to an environmental gradient by means of a beta-function. **Journal of Vegetation Science**, v.5, p. 215-228, 1994.

AUSTIN, M.P.; NICHOLLS, A.O.; MARGULES, C.R. Measurement of the realized qualitative niche: environmental niches of five *Eucalyptus* species. **Ecological Monographs**, v. 60, p.161–177, 1990.

BAGNOULS, F.; GAUSSEN, H. Les climats biologiques et leur classification. **Annales de Géographie**, v. 66, no. 355, p. 193-220, 1957.

BAGUETTE, M. The classical metapopulation theory and the real, natural world: A critical appraisal. **Basic and Applied Ecology**, v. 5, p. 213–224, 2004.

BALMFORD, A.; MOORE, J.L.; BROOKS, T.; BURGESS, N.; HANSEN, L.A. Conservation conflicts across Africa. **Science**, v. 291, p. 2616–2619, 2001.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing and the Environment**, v. 35, p. 161-173, 1991.

BARNOSKY, A.D.; HADLY, E.A.; BELL, C.J. Mammalian response to global warming on varied temporal scales. **Journal of Mammalogy**, v. 84, p. 354–368, 2003.

BARNOSKY, A.D.; KRAATZ, B.P. The role of climatic change in the evolution of mammals. **BioScience**, v. 57, n. 6. (no prelo).

BAR-YAM, Y. **Dynamics of complex systems (studies in nonlinearity)**. Colorado: Westview Press, 1997.

BEALE, R.; JACKSON, T. **Neural Computing**. Bristol, UK: Institute of Physics Publishing, 1992. 240 p.

BEHLING, H. Late Quaternary vegetational and climatic changes in Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology,** v. 99, p. 143-156, 1998.

BEHLING, H.; COHEN M.C.L; LARA R.J. Studies on Holocene mangrove ecosystem dynamics of the Bragança Península in Northeastern Pará, Brazil. **Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology,** v. 167, p. 225-242, 2001.

BEHLING, H.; NEGRELLE, R.R.B. Tropical rain forest and climate dynamics of the Atlantic lowland, Southern Brazil, during the Late Quaternary. **Quaternary Research**, v. 56, p. 383-389, 2001.

BEHLING, H.; NEGRELLE, R.B.Vegetation and pollen rain relationship from the tropical Atlantic Rain Forest in Southern Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 49, n. 4, p. 631-642, 2006.

BEHLING, H.; NEGRELLE, R.R.B.; COLINVAUX, P.A. Modern pollen rain data from the tropical Atlantic rain forest, Reserva Volta Velha, South Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 97, p. 287-299, 1997.

BELWARD, A. (ed.). **The IGBP-DIS global 1 km land cover data set "DISCover" – Proposal and implementation plans. Report of the Land Cover Working Group of the IGBP-DIS**. Stockholm: IGBP-DIS, 1996. (IGBP-DIS Working Paper, n. 13).

BENEDIKTSSON, J.A.; SVEINSSON, J.R.; ARNASON, K. Classification and Feature extraction of AVIRIS Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 5, p. 1194-1205, 1995.

BENEDIKTSSON, J.A.; SWAIN, P.H.; ERSOY, O.K. Neural Network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-28, n. 4, p. 540-551, 1990.

BENNETT, K.D. Continuing the debate on the role of Quaternary environmental change for macroevolution. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.**, v. 359, p. 295–303, 2004.

BERGER, A.L.; DELLA PIETRA, S.A.; DELLA PIETRA, V.J. A maximum entropy approach to natural language processing. **Computational Linguistics**, v. 22, n. 1, p. 39–71, 1996.

BERTALANFFY, L. V. 1986. **General Systems Theory**. New York: Braziller.

BIERKENS, M.F.P.; FINKE, P.A.; DE WILLIGEN, P. **Upscaling and down-scaling methods for environmental research**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.

BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; MATOS, D.J.; WERNER, A. (eds.). **A Serra do Mar e a porção oriental do Estado de Paraná**. Curitiba: Secretaria de Estado do Planejamento, 1978. 248 p.

BIRKS, H.J.B.; BIRKS, H.H. **Quaternary Paleoecology**. Baltimore:University Park Press, 1980.

BLASCHKE, T. The role of the spatial dimension within the framework of sustaintable landscapes and natural capital. **Landscape and Urban Planning**, v. 75, p. 198-226, 2006.

BLUNIER, T.; BROOK, E.J. Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period. **Science**, v. 291, p. 1497–1499, 2001.

BOGDANOV, A.A. **Essays in Tektology**. Seaside, CA: Intersys- tems, 1980.

BOJORQUEZ-TAPIA, L.A.; AZUARA, I.; EZCURRA, E.; FLORES, V.O.A. Identifying conservation priorities in Mexico through geographic information systems and modeling. **Ecological Applications**, v. 5, p. 215-231, 1995.

BONACCORSO, E.; KOCH, I.; PETERSON, A.T. Pleistocene fragmentation of Amazon species' ranges. **Diversity and Distributions**, v. 12, p. 157–164, 2006.

BOND, J.; BEAMER, D.A.; LAMB, T.; HEDIN, M. Combining genetic and geospatial analyses to infer population extinction in mygalomorph spiders endemic to the Los Angeles region. **Animal Conservation**, v. 9, n. 2, p. 145–157, 2006.

BOWKER, D.E.; DAVIS, R.E.; MYRICK, D.L.; STACY, K.; JONES, W.T. **Spectral reflectance of natural targets for use in remote sensing studies**. Hampton: Nasa, 1985. (Nasa-1139).

BRADLEY, R.S. **Paleoclimatology. Reconstructing climates of the Quaternary**. 2ª Edition. San Diego, CA: Academic Press. 1999. 610 p.

BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.P.L.F.; LUDEMIR, T.B. **Fundamentos de Redes Neurais Artificiais**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1998. 246 p.

BRASIL. **Levantamento de recursos naturais, Vol 32. Folhas SF 23/24, Rio de Janeiro/Vitória**. Rio de Janeiro, BR: IBGE. 775 p. 1983.

BRASIL. **Levantamento de recursos naturais, Vol 34. Folha SE.24, Rio Doce**. Rio de Janeiro, BR: IBGE. 544 p. 1987.

BREIMAN, L. Random Forests. **Machine Learning,** v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.

BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J.H.; OLSHEN, R.A.; STONE, C.J. **Classification and regretion trees**. New York: Chapman and Hall, 1984.

BROTONS, L.; THUILLER, W.; ARAÚJO, M.B.; HIRZEL, A.H. Presence-absence versus presence-only based habitat suitability models for bird atlas data: the role of species ecology and prevalence. **Ecography**, v. 27, p. 437-448, 2004.

BROWN, J.H. On the relationship between abundance and distribution of species. **American Naturalist**, n. 124, p. 255-279, 1984.

BROWN, J.H.; STEVENS, G.C.; KAUFMAN, D.M. The geographic range: size, shape, boundaries, and internal structure. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 27, p. 597–623, 1996.

BUNGE, M. **Treatise on basic philosophy, Vol. 4: Ontology II. A world of systems**. Dordrecht: Reide1, 1979.

BURLEY, F.W. Monitoramento da diversidade biológica no estabelecimento de prioridades em conservação. *In*: **Biodiversidade**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1988. p. 287 - 291.

BUSBY, JR. BIOCLIM - A bioclimate analysis and prediction system. *In*: MARGULES, C. R.; AUSTIN, M. P. (eds.). **Nature Conservation: cost effective biological surveys and data analysis**. Canberra, Australia: CSIRO, 1991. p. 64-68.

BUZAI, G.D. Geografía automatizada, Ciencias de la Información Geográfica y Ciencias Sociales integradas espacialmente: Avances cuantitativos para los estudios territoriales del siglo XXI. **Fronteras**, n. 4, p. 31-36, 2005.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. Geocomputation techniques for spatial analysis: are they relevant to health data? **Cadernos Saúde Pública**. v. 17, n. 5, p.1059-1081, 2001.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V.; DRUCK, S.; CARVALHO, M.S. Análise Espacial e Geoprocessamento. *In*: FUKS, S.D.; CARVALHO, M.S; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. (eds.). **Análise espacial de dados geográficos**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Processamento de Imagens, 2000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>. Acesso em: 18 out. 2002.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. New York: The Guilford Press, 1996. 622 p.

CARL, G.; KHUN, I. Analyzing spatial autocorrelation in species distributions using Gaussian and logit models. **Ecological Modelling**, v. 207, p. 159–170, 2007.

CARPENTER, G.; GILLISON, A.N.; WINTER, J. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. **Biodiversity and Conservation,** v. 2, p. 667-680, 1993.

CASTILLA, G. **Object-oriented analysis of Remote Sensing images for land cover mapping: conceptual foundations and a segmentation method to derive a baseline partition for classification**. Madrid, Spain: Polythecnic University of Madrid, 2003. (Ph.D. Thesis).

CATCHPOLE, R.D.J. Planning for biodiversity – opportunity mapping and habitat networks in practice: a technical guide. **English Nature Research Reports**, n. 687, p. 1-66, 2006.

CERQUEIRA, R. Determinação de distribuição potenciais de espécies. *In*: PERES-NETO, P.R.; VALENTIN, J.L.; FERNANDEZ, F.A.S. (eds.). **Tópicos em tratamento de dados biológicos**. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995. p. 141-161.

CHAN, J.C. *et al*., Detecting the nature of change in an urban environment: A comparison of machine learning algorithms. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 67, n. 2, p. 213-225, 2001.

CHEN, G.; PETERSON, A.T. Prioritization of areas in China for biodiversity conservation based on the distribution of endangered bird species. **Bird Conservation International**, v. 12, p. 197-209, 2002.

CHOMENTOWSKI, W.; SALAS, B.; SKOLE, D. Landsat pathfinder project advances deforestation mapping. **GIS World,** v. 7, p. 34-48, 1994.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledection espacial**. Madrid: Unigraf, 1990. 453p.

CLARK, J.S.; FASTIE, C.; HURTT, G.; JACKSON, S.T. *et al*. Reid's paradox of plant migration. **BioScience**, v. 48, p. 13–24, 1998.

COLLINGHAM, Y.C.; ERASMUS, B.F.N.; SIQUEIRA, M.F.D.; GRAINGER, A. *et al*. Extinction risk from climate change. **Nature**, v. 427, p. 145-148, 2004.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy classificatons of remotely sensed data. **Remote Sensing Environment**, v. 37, p.35-46, 1991.

COSTA, C.S.B.; DAVY, A.J. Coastal saltmarsh communities of Latin America. *In*: SEELIGER, U. (ed.). **Coastal plant communities of Latin America**. San Diego, CA: Academic Press Inc., 1992. p. 179-199.

COWELL, P.J.; ROY, P.S. **Shoreface transgression model: programming guide - outline, assumptions and methodology**. Sydney: Marine Studies Centre, University Sydney, 1988. Coastal Studies Unit Report. 23 p.

COWELL, P.J.; ROY, P.S.; JONES, R.A. Shoreface translation model: application to management of coastal erosion. *In*: BRIERLEY, G.; CHAPPELL, J. (eds). **Applied Quaternary studies**. Canberra: Department of Biogeography and Geomorphology, ANU, 1991. p. 57-73.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo:** Sistema de Informações Geográficas - SIG. Brasilia: CPRM, 2004. CD-ROM.

CRESWICK, R.J.; FARACH, H.A.; POOLE JR., C.P. **Introduction to renormalization group methods in physics**. New York: Wiley, 1992.

CRONIN, T.M. **Principles of paleoclimatology**. New York: Columbia University Press, 1999. 560 p.

CRÓSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

CURRAN, P.J.; KUPIEC, J.A. Imaging spectrometry: a new tool for ecology. *In*: DANSON, F.M.; PLUMMER, S.E. (ed.). **Advances in environmental remote sensing**. 1ª ed. Baffins Lane, England: Wiley, 1996. p.71-88.

CZECH, B.; KRAUSMAN, P.R. Distribution and causation of species endangerment in the United States. **Science**, v. 277, p. 1116–1117, 1997.

DANSON, F.M. Developments in the remote sensing of forest canopy structure. *In*: DANSON, F.M.; PLUMMER, S.E. (ed.). **Advances in environmental remote sensing**. 1ª ed. Baffins Lane, England: Wiley, 1996. p.53-70.

DARWIN, R.; TSIGAS, M.; LEWANDROWSKI, J.; RANESES, A. land use and cover in ecological economics. **Ecological Economics**, v. 17, p. 157-181, 1996.

DAVIS, M.B. Quaternary history and the stability of forest communities. *In*: Botkin, D.B. (ed.). **Forest succession**. New York: Springer-Verlag, 1981b. p. 132-177.

DE LA VILLE, N. **The grey wolf: habitat suitability analysis of a top predator over its global geographical range**. Cranfield, UK: IERC, Cranfield University, 1998. (Ph.D. Thesis).

DE LEEUW, J.; JIA,H.; YANG, L.; LIU, X. ; SCHMIDT, K.; SKIDMORE, A.K. Comparing accuracy assessments to infer superiority of image classification methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 1, p. 223-232, 2006.

DE PAULO, F.C.F.; MOZETO, A.A. Biochemical evolution of trace elements in a pristine watershed in the Brazilian southeastern coastal region. **Applied Geochemistry,** v. 16, p. 1139-1151, 2001.

DEFRIES, R.S.; TOWNSHEND, J.R.G. NDVI-derived land cover classification at global scales. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, p. 3567-3586, 1994.

DEVANEY, R.L. **An introduction to chaotic dynamical systems**. 2ª ed. Boulder, Colorado: Westview Press, 2003.

DI CASTRI, F., YOUNÈS, T. Introduction: Biodiversity, the emergence of a new scientific field - its perspectives and constrains. *In*: DI CASTRI, F.; YOUNÈS, T. (eds). **Biodiversity, Science and Development**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 1-11.

DI GREGORIO, A. **FAO land use statistics: A case study for three countries using remote sensing and GIS technology**. Consultancy Report for FAO Statistics Division. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1995.

DI GREGORIO, A. **Land Cover Classification System:Classification concepts and user manual**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2005. 212 p.

DI GREGORIO, A.; JANSEN, L.J.M. **The Africover Land Cover Classification System**: **A dichotomous, modular-hierarchical approach**. Working Paper with the Proposal for the International Working Group Meeting, Dakar, 29-31 July 1996. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1996.

DI GREGORIO, A.; JANSEN, L.J.M. **Land Cover Classification System**:**Classification concepts and user manual**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1998. 157 p.

DIAS, P.C. Sources and sinks in population biology. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 11, p. 326-330, 1996.

DIAZ, H.F.; MARKGRAF, V. (eds.). **El Niño and the Southern Oscillation: multiscale variability, global, and regional impacts**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

DIETTERICH, T.G. Approximate statistical tests for comparing supervised classification learning algorithms. **Neural Computation**, v.10, n.7, p.1895-924, 1998.

DIRZO, R.; HUBER-SANWALD, E.; HUENNEKE, L.F.; JACKSON, R.B. *et al*. Global biodiversity scenarios for the year 2100. **Science**, v. 287, p. 1770-1774, 2000.

DOBSON A.P.; RODRIGUEZ, J.P.; ROBERTS, W.M.; WILCOVE, D.S. Geographic distribution of endangered species in the United States. **Science**, v. 275, p. 550–553, 1997.

DUDA, R.O.; HART, P.E.; STORK, D.G. **Pattern classification**. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

DUDIK, M., PHILLIPS, S.J., SCHAPIRE, R.E. Performance guarantees for regularized maximum entropy density estimation. *In*: **Proceedings of the 17th Annual Conference on Computational Learning Theory**. New York: ACM Press, 2004. p. 655–662.

DZEROSKI, S.; LAVRAC, N. **Relational data mining**. Berlin: Springer, 2001.

EASTMAN, J.R. Single-pass measurement of the fractional dimensionality of digitized cartographic lines. *In*: **Proc. Canadian Cartographic Association Annual Meeting**, 1985.

EFRON, B. Bootstrap methods: another look at jacknife. **The American Statistician**, v. 7, 1-26. 1983.

EHLERINGER, J.R.; FIELD, C.B. **Scaling physiological processes: leaf to globe**. San Diego: Academic Press, 1993. p. 388.

ELITH, J.; GRAHAM, C.H.; ANDERSON, R.P.; DUDIK, M. *et al*. (NCEAS Modeling Group). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. **Ecography**, v. 29, p. 129–151, 2006.

ELLENBERG, H., MUELLER-DOMBOIS, D.A. A key to Raunkiaer plant life forms with revised subdivisions. **Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftg Rubel**, n. 37, p. 56-73, 1965/6.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. 306 p.

EMMECHE, C. The biosemiotics of emergent properties in a pluralist ontology. *In*: **Semiosis, evolution, energy: towards a reconceptualization of the sign**. *In*: TABORSKY, E. (ed.). Aachen: Shaker Verlag, 1999. p. 89-108.

ENGLER, R.; GUISAN, A.; RECHSTEINER, L. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. **Journal of Applied Ecology**, v. 41, p. 263-274, 2004.

ESPER, J.; COOK, E.R.; SCHWEINGRUBER, F.H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. **Science**, v. 295, p. 2250-2253, 2002.

EVERITT, B.S.; LANDAU, S.; LEESE, M. **Cluster Analysis**. 4ª ed. Loondon: Arnold, 2001.

FAO. Planning for sustainable use of land resources: towards a new approach. **FAO Land and Water Bulletin**, n. 2, 1995.

FAO. **World Reference Base for Soil Resources**. Rome: ISSS–ISRIC–FAO, 1998. (World Soil Resources Report, n. 84).

FARINA, A. **Principles and methods in Landscape Ecology - Toward a science of landscape**. Dordrecht, NL: Springer-Verlag, 2006. 414 p. (Landscape Series, v. 3).

FARINA, A. Cognitive landscape as interface carrier of meaning between organisms and resources. **Ecosemiotics**. (no prelo).

FARINA, A.; BELGRANO, A. The eco-field: a new paradigm for Landscape Ecology. **Ecological Research**, v. 19, p. 107-110, 2004.

FARINA, A.; BELGRANO, A. The eco-field hypothesis: toward a cognitive landscape. **Landscape Ecology**, v. 21, n. 1, , p. 5-17, 2006.

FARINA, A.; BELGRANO, A.; VILLA, A.E.P. **Eco-field: an integrated semiotic vision of the landscape**. (in prep.).

FARINA, A.; BOGAERT, J.; SCHIPANI, I. Cognitive landscape and information: new perspectives to investigate the ecological complexity. **BioSystems**, v. 79, p. 235-240, 2005.

FARMER, A.H.; ARMBRUSTER, M.J.; TERRELL, J.W.; SCHROEDER, R.L. Habitat models for land use planning: assumptions and strategies for development. **Trans. N. Amer. Wildlife and Natur. Resour. Conf.**, v. 47, p. 47-56, 1982.

FEDO, C.M.; WHITEHOUSE, M.J. Metasomatic origin of quartz-pyroxene rock, Akilia, Greenland, and it's implications for Earth's earliest life. **Science**, v. 296, p. 448-452, 2002.

FERNANDES, A.J.; AMARAL, G. Cenozoic tectonic events at the border of the Paraná basin, São Paulo, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, p. 911-931, 2002.

FERRIER, S. Mapping spatial pattern in biodiversity for regional conservation planning: where to from here? **Syst. Biol.**, v. 51, p. 331–363, 2002.

FERRIER, S.; DRIELSMA, M.; MANION, G.; WATSON, G. Extended statistical approaches to modelling spatial pattern in biodiversity in north-east New South Wales. II. Community level modelling. **Biodiversity Conservation**, v. 11, p. 2309–2338, 2002.

FIELDING, A.H.; BELL, J.F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. **Env. Conserv**., v. 24, p. 38-49, 1997.

FLETCHER III, C.H. **The non-steady state of the inner shelf and shoreline: Coastal change on the time scale of decades to millennia**. A pre-conference report from the University of Hawaii. November 9-12, 1999. Disponível em <http://imina.soest.hawaii.edu/Coastal_Conf/PDF/NSF.PDF>. Acesso em 15 dez. 2006.

FLOOD, R.L. Complexity: A definition by construction of a conceptual framework. **Systems Research**, v. 4, p. 177-185, 1987.

FLOOD, R.L.; CARSON, E. R. **Dealingwith complexity: An introduction to the theory and application of Systems Science**. 2ª ed. New York: Plenum Press, 1993.

FOLEY, J.A. The sensitivity of the terrestrial biosphere to climatic change: a simulation of the middle Holocene. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 8, p. 505–525, 1994.

FOLEY, J.A.; LEVIS, S.; COSTA, M.H.; CRAMER, W.; POLLARD, D. Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models. **Ecological Applications**, v. 10, p. 1620–1632, 2000.

FOODY, G.M. Approaches for the production and evaluation of fuzzy land cover classifications from remotely sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1317-1340, 1996.

FOODY, G.M.; ARORA, M.K. An evaluation of some factors affecting the accuracy of classification by an artificial neural network. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 799-810, 1997.

FOODY, G.M.; LUCAS, R.M.; CURRAN, P.J.; HONZAK, M. Non-linear mixture modelling without end-members using an artificial neural network. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 4, p. 937-953, 1997.

FOOK, K.D., MONTEIRO, A.M.V., CÂMARA, G. Web service for cooperation in biodiversity modeling. *In*: VIII Brazilian Symposium on GeoInformatics, GEOINFO, Campos do Jordão. **Annals of VIII Brazilian Symposium on GeoInformatics, GEOINFO**, v. 8., 2006.

FORMAN, R.T T. **Land mosaics: The ecology of landscapes and regions**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.

FRANCA-BARRETO, A.M.; REGO-BEZERRA, F.H.; SUGUIO, K.; HATSUE, S.; YEE, M.; PAIVA, R.P.; MUNITA, C.S. Late pleistocene marine terrace deposits in northeastern Brazil: sea-level change and tectonic implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatoloty, Palaeoecology,** v. 179, p. 57-69, 2002.

FRANÇOIS, C. Systemics and Cybernetics in a historical perspective. **Systems Research and Behavioral Science Syst Res**., v. 16, p. 203-219, 1999.

FRECKLETON, R.P.; WATKINSON, A.R. Large-scale spatial dynamics of plants: metapopulations, regional ensembles and patchy populations. **Journal of Ecology**, v. 90, p. 419–434, 2002.

FREEMAN, J.A.; SKAPURA, D.M. **Neural Network - Algorithms and programming techniques**. Reading, MA: Addison Wesley Pub. Comp., 1991. 401 p.

FRIEDL, M.A.; McIVER, D.K.; HODGES, J.C.F.; ZHANG, X.Y. *et al*. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 287-302, 2002.

FRIEDMAN, J.H. Multivariate Additive Regression Splines. **Annals of Statistics**, v.19, 1-67, 1991.

FRIEDMAN, J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. **Annals of Statistics**. v. 29, p. 1189-1232, 2001.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica. Período 1995-2000**. São Paulo. 2002. 43 p.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA/INPE/ISA. **Atlas de evolução dos remanescentes florestais e ecossistemas associados no domínio da Mata Atlântica no período de 1990-1995**. São Paulo: SOS Mata Atlântica/INPE/ISA. 1998. 58 p.

GAO, X.; HUETE, A.R.; NI, W.; MIURA, T. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 609-620, 2000.

GARDNER, R.H.; KEMP,W.M.; KENNEDY, V.S.; PETERSEN, J.E. (eds.). **Scaling relations in experimental ecology**. New York: Columbia University Press, 2001.

GASS, S.I. Evaluation of complex models. **Comput. & Ops. Res.**, v. 4, p. 27-35, 1977.

GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P.; GUILLEVIC, P.; ZAGOLSKI, F.; DEMAREZ, V.; TRICHON, V.; DEERING, D.; LEROY, M. Modeling BRF and radiation regime of boreal and tropical forests: I. BRF. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, p 281-316, 1999.

GAUBERT, P; PAPES, M.; PETERSON, A.T. Natural history collections and the conservation of poorly known taxa: Ecological niche modeling in central African rainforest genets (*Genetta* spp.). **Biological Conservation**, v. 130, p. 106–117, 2006.

GEHLKE, C.E.; BIEHL, K. Certain effects of grouping upon the size of the correlation coefficient in census tract material. **Journal of the American Statistical Association, Supplement**, v. 29, p. 169-170, 1934.

GELL-MANN, M.; TSALLIS, C. (eds.). **Nonextensive Entropy – Interdisciplinary Applications**. Oxford: Oxford University Press, 2003.

GIBSON, C., OSTROM, E.; AHN, T. Scaling issues in the Social Sciences: a report for the IHDP. Bonn, Germany: International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP), 1998. (IHDP Working Paper n. 1).

GILPIN, M. A comment on Quinn and Hastings: extinction in subdivided habitats. **Conservation Biology**, v. 2, p. 290-292, 1988.

GILPIN, M.; HANSKI, I. (eds.). Metapopulation dynamics: empirical and theoretical investigations. London: Academic Press, 1991. p. 73-88.

GLENZ, C.; MASSOLO, A.; KUONEN, D.; SCHLAEPFER, R. A wolf habitat suitability prediction study in Valais (Switzerland). **Landscape Urban Plan.**, v. 55, p. 55–65, 2001.

GOERTZEL, B. **From complexity to creativity computational models of evolutionary, autopoietic and cognitive dynamics**. New York: Plenum Press, 1996.

GOWARD, S.; WILLIAMS, D. Landsat and Earth System Science: Development of terrestrial monitoring. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, p. 887-900, 1997.

GRAHAM, C.H.; FERRIER, S.; HUETTMAN, F.; MORITZ, C.; PETERSON, A.T. New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. **Trends Ecol. Evol.**, v. 19, p. 497–503, 2004.

GRINNELL, J. Field tests of theories concerning distributional control. **The American Naturalist**, v. 51, p. 115–128, 1917.

GRINNELL, J. Geography of evolution. **Ecology**, v. 5, p. 225– 229, 1924.

GRISEBAH, A. **Die vegetation der Ende Nach Ihrer Klimatischen Anardnung**. Leipzig, 1872.

GROVE, J.M. **The Little Ice Age**. London: Methuen Publishing, 1988. 498 p.

GUISAN, A.; BROENNIMANN, O.; ENGLER, R.; YOCCOZ, N.G. *et al*. Using niche-based models to improve the sampling of rare species. **Conserv. Biol.**, v. 20, p. 501–511, 2006.

GUISAN, A.; THEURILLAT, J.P. Equilibrium modeling of alpine plant distribution: how far can we go? **Phytocoenologia**, v. 30, p. 353–384, 2000.

GUISAN, A.; THUILLER, W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. **Ecol. Lett.**, v. 8, p. 993– 1009, 2005.

GUISAN, A.; ZIMMERMANN, N.E. Predictive habitat distribution models in ecology. **Ecological Modelling**, v. 135, p. 147-186, 2000.

GUNNEL, Y. Passive margin uplifts and their influence on climatic change and weathering patterns of tropical shield regions. **Global and Planetary Change,** v. 18, p. 47-57, 1998.

GUO, Q.; KELLY, M.; GRAHAM, C.H. Support vector machines for predicting distribution of Sudden Oak Death in California. **Ecological Modelling**, v. 182, p. 75–90, 2005.

GUSTAFSON, E.J. Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art. **Ecosystems**, v. 1, n. 2, p.143-156, 1998.

HANLEY, J.A.; MCNEIL, B.J. The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve. **Radiology**, v. 143, p. 29- 36, 1982.

HANSEN, M.; DEFRIES, R.; TOWNSHEND, J.R.G.; SOHLBERG, R. Global land cover classification at 1km spatial resolution using a classification tree approach. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, p. 1331-1364, 2000.

HANSEN, M.; DEFRIES, R. S.; TOWNSHEND, J. R. G.; CARROLL, M. *et al*. Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: first results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. **Earth Interactions**, v. 7, n. 10, p. 1-15, 2003.

HANSKI, I. Metapopulation dynamics: does it help to have more of the same? **Trends in Ecology and Evolution**, n. 4, p. 113-114, 1989.

HANSKI, I. Metapopulation dynamics: from concepts and observations to predictive models. *In*: HANSKI, I.A.; GILPIN, M.E. (eds). **Metapopulation Biology: Ecology, Genetics and Evolution**. London: Academic Press, 1997. p. 69–91.

HANSKI, I. Metapopulation dynamics. **Nature**, v. 396, p. 41-49, 1998.

HANSKI, I. Metapopulation theory, its use and misuse. **Basic and Applied Ecology**, v. 5, p. 225–229, 2004.

HARRISON, S. Local extinction in a metapopulation context: an empirical evaluation. *In*: GILPIN, ME; HANSKI, I (eds.). **Metapopulation dynamics: empirical and theoretical investigations**. London: Academic Press, 1991. p. 73-88.

HARRISON, S. Metapopulations and conservation biology. *In*: EDWARDS, P.J.; MAY, R.M. (eds.). **Large-scale ecology and conservation**. London: Blackwell, 1994.

HARRISON, S.; KUTZBACH, J.E.; PRENTICE, I.C.; BEHLING, P.J.; SYKES, M.T. The response of northern hemisphere extratropical climate and vegetation to orbitally induced changes in insolation during the last interglaciation. **Quaternary Research**, v. 43, p. 174–184, 1995.

HARRISON, S.; TAYLOR, A.D. Empirical evidence for metapopulation dynamics. *In*: HANSKI, I.A.; GILPIN, M.E. (eds). **Metapopulation Biology: Ecology, Genetics and Evolution**. London: Academic Press, 1997. p. 27–42.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; BUJA, A. Flexible discriminant analysis by optimal scoring, **Journal of the American Statistical Association**, v. 89, p. 1255-1270, 1994.

HASTINGS, A.; HARRISON, S. Metapopulation dynamics and genetics. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 25, p. 167–188, 1994.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation.** New Jersey: Prentice Hall, 1994. 696 p.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Tradução de Paulo Martins Engel. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

HECHT-NIELSEN, R. **Neurocomputing**. San Diego: Addison-Wesley. 1989. 433p.

HENGEVELD, R. **Dynamic Biogeography**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

HENNIG, W. **Elementos de una sistemática filogenética**. Buenos Aires: Edit. Universitaria de Buenos Aires, 1968. 353 pp.

HEPNER., F. Artificial neural network classification using a minimal training set: comparison to conventional supervised classification. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 4, p. 469-473, 1990.

HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.G.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 1965-1978, 2005.

HIJMANS, R.J.; GUARINO, L.; CRUZ, M.; ROJAS, E. Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS. **Plant Genetic Resources Newsletter**, v. 127, p. 1257-1159, 2001.

HILBERT, D.W.; OSTENDORF, B. The utility of artificial neural networks for modelling the distribution of vegetation in past, present and future climates. **Ecological Modelling**, v. 146, p. 311–327, 2001.

HIRZEL, A.H.; HAUSSER, J.; CHESSEL, D.; PERRIN, N. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat suitability maps without absence data? **Ecology**, v. 83, p. 2027-2036, 2002.

HOLLAND, J.H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

HOLLAND, J.H. **Adaptation in natural and artificial systems**. 2ª ed. Cambridge: MIT Press, 1992.

HOLLAND, J.H. **Emergence - from chaos to order**. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1998.

HOLLING, C.S.; GUNDERSON, L.; PETERSON, G. Sustainability and Panarchies. *In*: **Panarchy: understanding transformations in human and natural systems**. GUNDERSON, L.H.; HOLLING, C.S. (eds.). Washington, DC: Island Press, 2002. p. 63-102.

HOLST, B.; MEDICI, E.P.; MARINHO-FINAL, O.J. KLEIMAN, D. *et al.* (eds.). **Lion Tamarin Population and Habitat Viability Assesssment Workshop 2005 - Final report.** Apple Valey, MN: IUCN/SSc Conservation Breeding Speialist Group, 2006. 193 p.

HOSMER, D.W.; LEMESHOW, S. Applied Logistic Regression. New York: John Wiley & Sons, 2000.

HUANG, C.; WYLIE, B.; YANG, L.; HOMER, C.; ZYLSTRA, G. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. **Int. J. Remote Sensing**, v. 23, n. 8, p. 1741–1748, 2002.

HUETE, A.R.A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing and the Environment**, v. 25, p. 53-70, 1988.

HUGGETT, R.J. **Environmental change: the evolving ecosphere**. London: Routledge, 1997. 378 p.

HUGHES, M.K.; DIAZ, H.F. Was there a “Medieval Warm Period?” and if so, where and when? **Climate Change**, v. 26, p. 109-142, 1994.

HUNTLEY, B.; BIRKS, H.J.B. An atlas of past and present pollen maps for Europe: 0–13000 years ago. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1983.

HUNTLEY, B.; COLLINGHAM, Y.C.; GREEN, R.E.; HILTON, G.M. *et al*. Potential impacts of climatic change upon geographical distributions of birds. **Ibis**, v. 148, p. 8-28, 2006.

HUNTLEY, B.; WEBB III, T. (eds.). **Vegetation history**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

HUTCHINSON, G.E. Concluding remarks. Cold Spring Harbour Symp. **Quantitative Biol.**, v. 22, p. 415-427, 1957.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manual técnico da vegetação brasileira**. Série Manuais Técnicos em Geociências, n. 1. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria de Geociências, 1992. 92 p.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.

ICA (Núcleo de Pesquisa em Inteligência Computacional Aplicada). **Tópicos especiais em Inteligência Computacional**. Rio de Janeiro: PUC-RIO, 2001. 29 p.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). **Estimativas de desmatamento na Amazônia Brasileira, 1998 – 1999**. Relatório. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2000.

IPARDES (Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social). **Diagnóstico ambiental da APA de Guaraqueçaba**. Curitiba: IPARDES, 1995. 166 p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate change 2001: the scientific basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate change 2007**. Disponível em <http://www.ipcc.ch>. Acess em 25 abril 2007.

IRFAN-ULLAH, M.; AMARNATH, G.; MURTHY, M.S.R.; PETERSON, A.T. Mapping the geographic distribution of *Aglaia bourdillonii* Gamble (Meliaceae), an endemic and threatened plant, using ecological niche modeling. **Biodiversity and Conservation**. (no prelo).

IUCN (The World Conservation Union). **IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1.** Gland, Switzerland e Cambridge, UK: IUCN, Species Survival Commission, 2001. 30 p.

IUCN (The World Conservation Union). **Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 6.2.** Prepared by the Standards and Petitions Working Group of the IUCN SSC Biodiversity Assessments Sub-Committee in December 2006. Gland, Switzerland e Cambridge, UK: IUCN, Standards and Petitions Working Group, 2006. 60 p. Disponível em <http://app.iucn.org/webfiles/doc/SSC/RedList/RedListGuidelines.pdf>.

IUSS Working Group WRB. **World reference base for soil resources 2006**. 2ª ed. World Soil Resources Reports, no. 103. Rome: FAO. 2006.

JABLONSKI, D.; FLESSA, K.W.; VALENTINE, J.W. Biogeography and Palaeobiology. **Paleobiology**, v. 11, p. 75–90, 1985.

JACKSON, S.T.; OVERPECK, J.T. Responses of plant populations and communities to environmental changes of the late Quaternary. **Paleobiology**, v. 26, p. 194–220, 2000.

JARVIS, P.G. Scaling processes and problems. **Plant, Cell and Environment**, v. 18, p. 1079-1089, 1995.

JAYNES, E.T. Information theory and statistical mechanics. **Physics Reviews**, v.106, p. 620-630, 1957.

JELINSKI, D.E.; WU, J. The modifiable areal unit problem and implications for Landscape Ecology. **Landscape Ecology**, v. 11, p. 129-140, 1996.

JENERETTE, G.D.; WU, J. On the definitions of scale. **Bulletin of the Ecological Society of America**, v. 81, p. 104-105, 2000.

JENSEN, J. **Introductory Digital Image Processing**. 2ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

JIMÉNEZ-VALVERDE, A.; LOBO, J.M. Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either–or presence–absence. **Acta Oecologica**. (no prelo).

JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASOUKA, E. *et al*. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 3-15. 2002b.

KAUFFMANN, S. **The origins of order**. New York: Addison-Wesley, 1993.

KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The Tasseled Cap - a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. **Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data.** West Lafayette, Indiana: Perdue University, 1976. p. 41-51.

KEARNEY, M. Habitat, environment and niche: what are we modelling. **Oikos**, v. 115, issue 1, p. 186-191, 2006.

KING, A.W.; JOHNSON, A.R.; O'NEILL, R.V. Transmutation and functional representation of heterogeneous landscapes. **Landscape Ecology**, v. 5, p. 239-253, 1991.

KLECKA, W.R. **Discriminant analysis**. Beverly Hills: Sage University Publication, 1980. (Series: Quantitative applications in the social sciences).

KLEIMAN, D.G.; RYLANDS, A.B. (eds.). **Lion Tamarins: Biology and Conservation.** Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 2002.

KNAPP, S. Dynamic diversity. **Nature**, v. 422, p. 475, 2003.

KNOUFT, J.H.; LOSOS, J.B.; GLOR, R.E.; KOLBE, J.J. Phylogenetic analysis of the evolution of the niche in lizards of the *Anolis sagrei* group. **Ecology**, v. 87, n. 7 supplement, p. 29–38, 2006.

KOESTLER, A. **The ghost in the machine**. New York: Random House, 1967.

KRUMMEL, J.R. *et al*. Landscape patterns in a disturbed environment. **Oikos**, v.8, n.3, p. 321-324, 1987.

KUTZBACH, J., BONAN, G.; FOLEY, J.; HARRISON, S.P. Vegetation and soil feedbacks on the response of the African monsoon to orbital forcing in the early to middle Holocene. **Nature**, v. 384, p. 623–626, 1996.

LAGRO JR, J. Assessing patch shape in landscape mosaics. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.57, n. 3, p. 285-293, 1991.

LAM, N.S. Description and measurements of Landsat TM Images using fractals. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 2, p. 285-293, 1990.

LANDIS, J.; KOCH, G.G. The measurements of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 3, p. 159-179, 1977.

LAUER, W. Climate and Weather, Chp. 2. *In*: LIETH, H.; WERGER, M.J.A. (eds.). **Tropical rain forest ecosystems**. **Ecosystems of the World 14B**. Amsterdam: Elsevier, NT, 1989. p. 7-53.

LAVERGNE, S.; MOLINA, J.; DEBUSSCHE, M. Fingerprints of environmental change on the rare Mediterranean flora: a 115-year study. **Global Change Biol**., v. 12, p. 1466–1478, 2006.

LEATHWICK, J.R. Are New Zealand's *Nothofagus* species in equilibrium with their environment? **J. Veg. Sci.**, v. 9, p. 719–732, 1998.

LEATHWICK, J.R.; WHITEHEAD, D.; MCLEOD, M. Predicting changes in the composition of New Zealand's indigenous forests in response to global warming: a modelling approach. **Environ. Softw.**, v. 11, p. 81–90, 1996.

LEDRU, M.P.; BRAGA, P.I.S.; SOUBIÈS, F.; FOURNIER, M.; MARTIN, L.; SUGUIO, K.; TURCQ, B. The last 50.000 years in the Neotropics (Southern Brasil): evolution of vegetation and climate. **Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology**, v. 123, p. 239-257, 1996.

LEDRU, M.P.; SALGADO-LABORIAU, M.L.; LORSCHEITTER, M.L. Vegetation dynamics in southern and central Brazil during the last 10.000 years BP. Review of **Paleobotany and Payinology**, v. 99, n.2, p. 131-142, 1998.

LEE, T.; RICHARDS, J.A.; SWAIN, P.H. Probabilistic and Evidential Approaches for Multisource Data Analysis, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-25, n. 3, p. 283-292, 1987.

LEES, B. **Improving the spatial extension of point data**. 1996. Disponível em http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROMROM/sf_papers/lees_brian/santafe2.htm. Acesso em 18 jan. 2002.

LEES, B.; RITMAN, K. Decision-tree and rule-induction approach to integration of remotely sensed and GIS data in mapping vegetation in disturbed or hilly enviroments. **Environmental Management**, v. 15, n. 6, p. 823-831., 1991.

LEGENDRE, P.; DALE, M.R.T.; FORTIN, M.J.; GUREVITCH, J. *et al*. The consequences of spatial structure for the design and analysis of ecological field surveys. **Ecography**, v. 25, p. 601–615, 2002.

LEGENDRE, P.; FORTIN, M. Spatial pattern and ecological analysis. **Vegetatio**, v. 80, p. 107-138, 1989.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical Ecology**. 2ª ed. Amsterdam: Elsevier, 1998.

LEHMANN, A.; OVERTON, J.M.; AUSTIN, M.P. Regression models conservation for spatial prediction: their role for biodiversity and conservation. **Biodivers. Conserv.**, v. 11, p. 2085–2092, 2002.

LEVINS, R. The strategy of model building in population biology. **Amer. Scient.**, v. 54, p. 421-431, 1966.

LEVINS, R. Extinction. *In*: GESTERNHABER, M. (ed.), **Some mathematical problems in Biology**. Providence, Rhode Island: American Mathematical Society, 1970. p. 77-107.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750 p.

LIU, C.; BERRY, P.M.; DAWSON, T.P.; PEARSON, R.G. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. **Ecography**, v.28, p. 385–393, 2005.

LLORENTE, J; PAPAVERO, N; HERNANDÉZ , A.B. Síntesis histórica de la Biogeografía. LLORENTE, J; MORRONE, J.J. (eds.). **Introducción a la Biogeografía en Latinoamérica: teorías, conceptos, métodos y aplicaciones**. Cidade do México: Las Prensas de Ciencias, UNAM, 2001. p. 1-14.

LOMOLINO, M.V.; HEANEY, L.R. (eds.). **Frontiers of Biogeography**. Sunderland, MA: Sinauer Associates Inc., 2004.

LOMOLINO, M.V.; RIDDLE, B.R.; BROWN, J.H. **Biogeography**. 3ª ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates Inc., 2006.

LOMOLINO, M.V.; SAX, D.F.; BROWN, J.H. (eds.) **Foundations of Biogeography**. Chicago, IL: University of Chicago Press, 2004.

LONGLEY, P. **Geocomputation: a primer**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

LORINI, M.L. **Um breve ensaio em abordagem sistêmica sobre a interação entre a drenagem e as unidades de paisagem na Ilha de Superagüi (PR): unidades**

geomorfológicas. Rio de Janeiro: Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de Geomorfologia Fluvial, do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997. 56 p.

LORINI, M.L.; PERSSON, V.G. Nova espécie de *Leontopithecus* LESSON 1840, do sul do Brasil (Primates, Callithrichidae). **Boletim do Museu Nacional, nova série**, n. 338, p. 1-14, 1990.

LORINI, M.L.; PERSSON, V.G. Status of field research on *Leontopithecus caissara*: The Black-faced Lion Tamarin Project. **Netropical Primates (suppl.)**, n. 2, p. 52-55, 1994.

LORINI, M.L.; PERSSON, V.G.; GARAY, I.E.G. ; XAVIER-DA-SILVA, J. Abordagem espacialmente explícita, hierárquica e multiescalar para análises de distribuição e persistência de espécies, populações e hábitats em paisagens heterogêneas. *In*: VII Congresso de Ecologia do Brasil, 2005, Caxambu. **Anais do VII Congresso de Ecologia do Brasil**. São Paulo: Sociedade de Ecologia do Brasil, 2005.

LORINI, M.L.; PERSSON, V.G.; PINILLOS-GALINDO, M. **Os ambientes quaternários litorâneos do Brasil: Bases geomorfológicas para a interpretação da diversidade de ecossistemas**. Rio de Janeiro: Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Seminário de Doutorado II - Geografia Física, do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003. 22 p.

LORINI, M.L.; PERSSON, V.G.; XAVIER-DA-SILVA, J. Geoprocessamento aplicado à conservação de espécies ameaçadas de extinção: o Projeto Mico- Leão-da-Cara-Preta. *In*: 1ª Semana Estadual de Geoprocessamento – RJ, 1996, Rio de Janeiro. **Anais da 1ª Semana Estadual de Geoprocessamento – RJ**. Rio de Janeiro: FGeo-RJ, Clube de Engenharia, UFRJ, SBC, SEARJ, 1996. p. 147-159.

LORENZ, E.N. **The essence of chaos**. Seattle: University of. Washington Press, 1996, 227 p.

LORUP, E.J. **Idrisi Tutorial on www**. Disponível em < http://www.sbg.ac.at>. Acesso em 10 fev. 2007.

LOVELAND, T.R.; REED, B.C.; BROWN, J.F.; OHLEN, D.O. *et al*. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, p. 1303-1330, 2000.

LUCAS, C. Complexity philosophy as a computing paradigm. *In*: ROETZHEIM, W. **Why things are - how complexity theory answers life's toughest questions**. Ital.: Level 4 Press, 2007. Appendix.

MACARTHUR, R.H. **Geographical Ecology: patterns in the distribution of species**. New York: Harper & Row, Publishers, 1972.

MACARTHUR, R.H.; WILSON, E.O. **The theory of island biogeography**. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1967.

MACKEY, B.G. **The role of GIS and environmental modeling in conservation of biodiversity**. Disponível em <http://www.ngcia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CDROM/sf_papers/brendan_mackey/mackey_paper.htm>. Acesso em 12 dez. 2000.

MACKEY, B.; LINDENMAYER, D.B. Towards a hierarchical framework for modelling the spatial distribution of animals. **J. Biogeogr.**, v. 28, p. 1147–1166, 2001.

MAGANA, V.; CONDE, C.; SANCHEZ, O.; GAY, C. Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. **Climate Research**, v. 9, p. 107-114, 1997.

MALINGREAU, J.P.; ACHARD, F.; D'SOUZA, G.; STIBIG, H.J. *et al*. AVHRR for global tropical forest monitoring: The lessons of the TREES project. **Remote Sensing Reviews**, v. 12, p. 29-40, 1995.

MANDELBROT, B.B. **The fractal geometry of nature**. W.H. Freeman and Company, 1982. 483p.

MARCEAU, D.J. The scale issue in social and natural sciences. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, p. 347-356, 1999.

MARCOT, B.G.; RAPHAEL, M.G.; BERRY, K.H. Monitoring wildlife habitat and validation of wildlife-habitat relationships models. **Trans. 48th North American Wildlife and Natural Resources Conference**. Kansas City: Wildlife Management Institute, 1983.

MARK, D.M. Geographic Information Science: Defining the field. *In* Duckmam, M.; GOODCHILD, M.F.; WORBOYS, M.F. (eds.). **Foundations of Geographic Information Science**. New York: Taylor and Francis, 2003. p. 3-18

MARSTUCELLI, P.; RODRIGUES, M.G. Novas populações do mico-leão caiçara, *Leontopithecus caissara* (Lorini & Persson, 1990) no sudeste do Brasil (Primates - Callitrichidae). **Revista do Instituto Florestal**, v.4, p.920-924, 1992.

MARTIN, L.; VILAS-BOAS, G.S.; FLEXOR, J.M. Introdução ao estudo do Quaternário do litoral do Estado da Bahia – Trecho Salvador Ilhéus. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 9, p. 309-320, 1979.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.M.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; VILAS-BOAS, G.S. Le quaternaire marin brésilien (littoral pauliste, sud fluminense et bahianais). **Cah. O.R.S.T.O.M. Série Géologie**, v. 11, p. 95-124, 1979/80.

MARTÍNEZ, I.; CARREÑO, F.; ESCUDERO, A.; RUBIO, A. Are threatened lichen species well-protected in Spain? Effectiveness of a protected areas network. **Biological Conservation**, v. 133, p. 500-511, 2006.

MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images**. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 292 p.

MATURANA, H.; VARELA, F. **Autopoiesis and cognition**. Boston: Reidel, 1980.

MAURER, B. **Geographical population analysis: tools for the analysis of the biodiversity**. Oxford: Balckwell Scientific Publications, 1994.

MAURER, B. Statistical mechanics of complex ecological aggregates. **Ecological Complexity**, v.2, n. 1, p. 71-85, 2005.

MAYAUX, P.; ACHARD, F.; MALINGREAU, J.P. Global tropical forest area measurements derived from coarse resolution satellite imagery: A comparison with other approaches. **Environmental Conservation**, v. 25, p. 37-52, 1998.

MCCARTHY, H.H.; HOOK, J.C.; KNOS, D.S. **The measurement of association in industrial geography**. Iowa City: Department of Geography, State University of Iowa, 1956.

MCCOY, E.D.; BELL, S.S. Habitat structure: The evolution and diversification of a complex topic. *In*: BELL, S.; McCOY, E.; MUSHINSKY, H. (eds.). **Habitat structure: The physical arrangement of objects in space**. London: Chapman & Hall, 1991.

MCGARIGAL, K.; MARKS, B. J. **FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure**. Portland, OR: USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995. (Gen. Tech. Report PNW-GTR-351).

MCNEMAR, Q. Note on the sampling error of the difference between correlated proportions or percentages. **Psychometrika**, v. 12, p. 153-157, 1947.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). **Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis**. Washington, DC: World Resources Institute,. 2005. 86 p.

MEENTEMEYER, V. Geographical perspectives of space, time, and scale. **Landscape Ecology**, v. 3, p. 163-173, 1989.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: Bradford, MIT Press, 1996.

MEYER, W.B.; TURNER II, B.L. Human population growth and global land use/land cover change. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 23, p. 39-61, 1992.

MICHIE, D.; SPIEGELHALTER, D.J.; TAYLOR, C.C. **Machine learning, neural and statistical classification**. New York: Ellis Horwood, 1994.

MIDGLEY, G.F.; HANNAH, L.; MILLAR, D.; RUTHERFORD, M.C.; POWRIE, L.W. Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot. **Global Ecol. Biogeogr**., v. 11, p. 445–451, 2002.

MILLAR, C.I.; BRUBAKER, L.B. Climate change and paleoecology: New contexts for restoration ecology. *In*: PALMER, M.; FALK, D.; ZEDLER, J. (eds.). **Foundations of Restoration Ecology: The science and practice of ecological restoration**. Washington, DC: Island Press, 2006. p. 315-340.

MILLER, J.G. **Living Systems**. New York: McGraw-Hill, 1978.

MILLINGTON, A.C.; VELEZ-LIENDO, X.; BRADLEY, A.V. Scale dependence in multitemporal mapping of forest fragmentation in Bolivia: implications for explaining in temporal trends in landscape ecology and applications to biodiversity conservation. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 289-299, 2003.

MILNE, B.T. Measuring the fractal geometry of landscapes. **Applied Mathematics and Computation**, v. 27, n. 1, p. 67-79, 1988.

MITCHELL, T. **Machine Learning**. New York: McGraw Hill, 1997. (Series in Computing Science).

MOJZSIS, S.J.; G. ARRHENIUS, K.D.; MCKEEGAN, T.M.; HARRISON, A.P. *et al*. Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 1996.

MONMONIER, M.S. Measures of pattern complexity for choropleth maps. **The American Cartographer**, v. 1, n. 2, p. 159-169, 1974.

MONMONIER, M.S. **Computer-assisted cartography: principles and prospects**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc., 1982.

MOORE, D.M.; LEES, B.G.; DAVEY, S.M. A new method for predicting vegetation distributions using decision tree analysis in a Geographic Information System. **Environmental Management**, v. 15, n. 1, p. 59-71, 1991.

MUEHE, D. O litoral brasileiro e a sua compartimentação. *In*: BAPTISTA DA CUNHA, S.; TEIXEIRA GUERRA, A. J. (orgs.). **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 1998. p. 273-349.

MUEHE, D.; CARVALHO, V.G. Geomorfologia, cobertura sedimentar e transporte de sedimentos na plataforma interna entre a Ponta de Saquarema e o Cabo Frio (RJ). **Boletim do Instituto de Oceanografia**, v. 41, n. 1/2, p. 1-12, 1993.

NASA. **Landsat 7**. Disponível em <http://geo.arc.nasa/sge/landsat/17.html>. Acesso em 01 mar. 2003a.

NASA. **MODIS web**. Disponível em < http://modis.gsfc.nasa.gov/MODIS/INSTRUMENT/ MODIS.html>. Acesso em Acesso em 01 mar. 2003b.

NAVEH, Z.; LIBERMANN, A.S. **Landscape Ecolgy theory and applications**. 2ª ed. New York: Springer, 1994.

NEPSTAD, D.C.; VERISSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C. *et al*. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, p. 505-508, 1999.

NETER, J.; KUTNER, M.N.; NACHTSSHEIM, C.J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. 4ª ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1996, 791 p.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421 p.

NIX, H.A. A biogeographic analysis of Australian elapid snakes. *In*: LONGMORE, R. **Atlas of Australian Elapid Snakes**. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1986. p. 4-15.

NOGUEIRA-MORERA, A.A. Relevo. *In*: **Geografía do Brasil: Região Nordeste**. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica, v. 2, 1977. p. 4-46.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992. 308 p.

O'NEILL, R.V.; DEANGELIS, D.L.; WAIDE, J.B.; ALLEN, G.E. **A Hierarchical concept of ecosystems**. Princeton: Princeton University Press, 1986. 262 p. (Monographs in Population Biology, n. 23).

OBERHAUSER, K.; PETERSON, A.T. Modelling current and future potencial wintering distributions of eastern North American monarch butterflies. **PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)**, v. 100, n. 24, p. 14063-14068, 2003.

ODUM, E. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Interamericana, 1985.

OLDEN, J.D.; JACKSON, D.A. Illuminating the "black box": a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks. **Ecological Modelling**, v. 154, p. 135-150, 2002.

OLDEN, J.D.; POFF, N.L.; BLEDSOE, B.P. Incorporating ecological knowledge into ecoinformatics: An example of modeling hierarchically structured aquatic communities with neural networks. **Ecological Informatics** , v.1, p. 33-42, 2006.

OLIVEIRA, L.G.L.; PEREIRA, L.M.; PEREIRA, G.; MORAES, E.C.; MAEDAL. E.E. **Estudo da variabilidade de índices de vegetação através de imagens do ETM+/LANDSAT-7**. *In*: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, 21-26 abril 2007. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5995-6002.

OLSON, D.M; DINERSTEIN, E; WIKRAMANAYAKE, E.D.; BURGESS, N.D. *et al*. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. **BioScience**, v. 51, p. 933-938, 2001.

O'NEILL, R.V.; KING, A.W. Homageto St. Michael; or, why are there so many books on scale? *In*: PETERSON, D.L.; PARKER, V.T. (eds.). **Ecological scale: theory and applications**. New York: Columbia University Press, 1998. p. 3-15.

OPDAM, P.; WASCHER, D. Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. **Biological Conservation**, v. 117, p. 285-297, 2004.

OPENSHAW, S. A geographical solution to scale and aggregation problems in region building, partitioning and spatial modelling. **Institute of British Geographers, Transactions, New Series**, v. 2, p. 459-472, 1977.

OPENSHAW, S. An empirical study of some zone-design criteria. **Environment and Planning**, v. 10, p. 781-794, 1978.

OPENSHAW, S. Le problème de l'agrégation spatiale en géographie. **L'Espace Géographique**, v. 1, p. 15-24, 1981.

OPENSHAW, S. **The modifiable areal unit problem**. Norwich, England: Geobooks, 1984a. (Concepts and Techniques in Modern Geography - CATMOG, n. 38).

OPENSHAW, S. Ecological fallacies and the analysis of areal census data. **Environment and Planning** , v. 16, p. 17-31, 1984b.

OPENSHAW, S. Neuroclassification of Spatial Data. *In*: HEWITSON, B.C.; CRANE, R.G. (eds.). **Neural Nets: Applications in Geography**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.

OPENSHAW, S.; ABRAHART, R.J. Geocomputation. **Proceedings of the First International Conference on Geocomputation**. Leeds: University of Leeds, 1996. p. 665-666.

OPENSHAW, S.; TAYLOR, P.J. A million of so correlation coefficients: Three experiments on the modifiable areal unit problem. *In*: WRIGLEY, N. (ed.). **Statistical Applications in the Spatial Sciences**. London: Pion, 1979. p. 127-144.

OPENSHAW, S.; TAYLOR, P.J. The modifiable areal unit problem. *In*: WRIGLEY, N.; BENNETT, R.J. (eds.). **Quantitative Geography: a british view**. London: Routledge and Kegan Paul, 1981. p. 60-70.

ORTEGA-HUERTA, M.A.; PETERSON, A.T. Modelling spatial patterns of biodiversity for conservation prioritization in North-eastern Mexico. **Diversity and Distributions**, v. 10, p. 39-54, 2004.

OTT, L.; LARSON, R.F.; MENDENHALL, W. **Statistics: a tool for the social sciences**. Boston: Duxbury Press, 1983.

OVERPECK, J.T.: HUGHEN, K.; HARDY, D. *et al*. Arctic environmental change of the last four centuries. **Science**, v. 278, p. 1251-1256, 1997.

OVERPECK, J.T.; WEBB, R.S.; WEBB III, T. Mapping eastern North American vegetation change of the past 18 ka: no-analogs and the future. **Geology**, v. 20, p. 1071–1074, 1992.

PAL, M.; MATHER, P.M. Support vector machines for classification in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 5, p. 1007-1011, 2005.

PAOLA, J.D.; SCHOWENGERDT, R.A. A detailed comparison of backpropagation neural network and maximum-likelihood classifiers for urban land use classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-33, n. 4, p. 981-996, 1995.

PAPAVERO, N.; LLORENTE, J.B. Un nuevo concepto en biología comparada: el "eidoforonte". **Publ. Esp. Mus. Zool. UNAM, México**, v. **5**, p. 21-29, 1992.

PAPES, M. Ecological niche modeling approaches to conservation of endangered and threatened birds in central and eastern Europe. **Biodiversity Informatics**, v. 4, p. 14-26, 2006.

PARMESAN, C.; YOHE, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. **Nature**, v. 421, p. 37–42, 2003.

PARMESAN, C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.**, v. 37, p. 637–669, 2006.

PARROTT, L. Complexity and the limits of ecological engineering. **Trans. ASAE**, v. 45, p. 1697-1702, 2002.

PATTEE, H.H. **Hierarchy theory: the challenge of complex systems**. New York: George Braziller, 1973. 156 p.

PAULI, H.; GOTTFRIED, M.; REITER, K.; KLETTNER, C.; GRABHERR, G. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA*master site Schrankogel, Tyrol, Austria. **Global Change Biol.**, v. 13, p. 147–156, 2006.

PEARSON, R.G.; DAWSON, T.P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? **Global Ecology and Biogeography**, v. 12, p. 361–371, 2003.

PEARSON, R.G.; DAWSON, T.P.; BERRY, P.M.; HARRISON, P.A. SPECIES: A spatial evaluation of climate impact on the envelope of species. **Ecological Modelling**, v. 154, p. 289-300, 2002.

PEARSON, R.G.; DAWSON, T.P.; LUI, C. Modelling species distribution in Britain: a hierarchical integration of climate and land-cover data. **Ecography**, v. 27, p. 285–298, 2004.

PEIRCE, C.S. **Scientific Metaphysics. Vol. VI of Collected Papers**. *In*: HARTSHORNE, C.; WEISS, P. (eds.). Cambridge: Harvard University Press, 1935.

PEROBELLI, F.S.; ALMEIDA, E.S.; ALVIM, M.I.S.A.; FERREIRA, P.G.C. Produtividade do setor agrícola brasileiro (1991-2003): uma análise espacial. **Nova Economia**, v. 17, n. 1, p. 65-91, 2007.

PERSSON, V.G. **Geoprocessamento aplicado a análises de viabilidade de populações de espécies ameaçadas de extinção: o mico-leão-da-cara-preta, *Leontopithecus caissara*, um estudo de caso.** Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001. Dissertação. (Mestrado em Geografia).

PERSSON, V.G.; LORINI, M.L. Notas sobre o mico-leão-de-cara-preta, *Leontopithecus caissara* Lorini & Persson 1990, no sul do Brasil (Primates, Callithrichidae). *In*: YAMAMOTO, M.E.; SOUSA, M.B.C. (eds.). **A Primatologia no Brasil - 4**. Natal: Sociedade Brasileira de Primatologia, 1993. p. 169-181.

PESSENDA, L.C.R.; GOUVEIA, S.E.M.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; VALENCIA, E.P.E. Holocene fire and vegetation in southeastern Brazil as deduced from fossil charcoal and soil carbon isotopes. **Quaternary International**, v. 114, n. 1, p. 35–43, 2004.

PETERSEN, L.R.; ROEHRIG, J.T. West Nile virus: A reemerging global pathogen. **Emerging Infectious Diseases**, v. 7, p. 1-10, 2001.

PETERSON, A.T.; BAUER, J.T.; MILLS, J.N. Ecologic and geographic distribution of filovirus disease. **Emerging Infectious Diseases**, v. 10, n. 1, p. 40-47, 2004a.

PETERSON, A.T.; LASH, R.R.; CARROLL, D.S.; JOHNSON, K.M. Geographic potential for outbreaks of Marburg hemorrhagic fever. **Am. J. Trop. Med. Hyg.**, v. 75, n. 1, p. 9–15, 2006.

PETERSON, A.T.; ORTEGA-HUERTA, M.A.; BARTLEY, J.; SANCHEZ-CORDERO, V.; SOBERON, J. *et al*. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. **Nature**, v. 416, p. 626-629, 2002a.

PETERSON, A.T.; PAPES, M.; KLUZA, D.A. Predicting the potential invasive distributions of four alien plant species in North America. Weed Science, v. 51, n. 6, p. 863-868, 2003a.

PETERSON, A.T.; SANCHEZ-CORDERO, V.; BEARD, C.B.; RAMSEY, J.M. Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico. **Emerging Infectious Diseases**, v. 8, p. 662-667, 2002b.

PETERSON, A.T.; SCACHETTI-PEREIRA, R.; KLUZA, D.A. Assessment of invasive potential of *Homalodisca coagulata* in Western North America and South America. **Biota Neotropica**, v. 3, n. 1, 2003b.

PETERSON, A.T.; SCACHETTI-PEREIRA, R.; NEVES, V.F.C. Using epidemiological survey data to infer geographic distributions of leishmaniasis vector species. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 37, p. 10-14, 2004b.

PETERSON, A.T.; VIEGLAIS, D.A. Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem. **BioScience**, v. 51, n. 5, p. 363-371, 2001.

PETERSON, D.L.; PARKER, V.T. (eds.). **Ecological scale: theory and applications**. New York: Columbia University Press, 1998.

PETERSON, G. Scaling ecological dynamics: self-organization, hierarchical structure, and ecological resilience. **Climate Change**. (no prelo).

PHILLIPS, S.J.; ANDERSON, R.P.; SCHAPIRE, R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological Modelling**, v. 190, n. 3-4, p. 231-259, 2006.

PHILLIPS, S.J.; DUDIK, M.; SCHAPIRE, R.E. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *In*: **Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning**. New York: ACM Press, 2004. p. 655–662.

PIANKA, E. R. **Ecologia evolutiva**. Barcelona: Ediciones Omega, 1992. 365 p.

PIELKE, R.A.; AVISSAR, R.; RAUPACH, M.; DOLMAN, A.J. *et al*. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. **Global Change Biology**, v.4, p. 461–475, 1998.

PIMM, S.L.; RAVEN, P. Biodiversity - Extinction by numbers. **Nature**, v. 403, p. 843–845, 2000.

PINTO, M.P.; BINI, L.M.; DINIZ-FILHO, J.A.F. Análise quantitativa da influência de um novo paradigma ecológico: autocorrelação espacial. **Acta Scientiarum: Biological Sciences**, v. 25, n. 1, p. 137-143, 2003.

PIRES, F.M.R. Arcabouço Geológico. *In*: BAPTISTA DA CUNHA, S.; TEIXEIRA GUERRA, A.J. (Org). **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 1998. p. 17-70.

POOLE, D.; MACKWORTH, A.; GOEBEL, R. **Computational Intelligence: a logical approach**. Oxford: Oxford University Press, 1998.

POUNDS, A.J.; BUSTAMANTE, M.R.; COLOMA, L.A., CONSUEGRA, J.A. *et al*. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. **Nature**, v. 439, p. 161–167, 2006.

POWELL, M.; ACCAD, A.; SHAPCOTT, A. Geographic Information System (GIS) predictions of past, present habitat distribution and areas for re-introduction of the endangered subtropical rainforest shrub *Triunia robusta* (Proteaceae) from south-east Queensland Australia. **Biological Conservation**, v. 123, p. 165–175, 2005.

PRADO, F. **Ecologia, comportamento e conservação deo mico-leão-da-cara-preta (*Leontopithecus caissara*) no Parque Nacional de Superagüi**. Piracicaba: Universidade Estadual de São Paulo, 1999. Dissertação (Mestrado em Ecologia). 70 p.

PRADO, F.; VALLADARES-PÁDUA, C.B.; AMARAL, A.T. Levantamento populacional de mico-leão-da-cara-preta (*Leontopithecus caissara*) no estado de São Paulo, Brasil. *In*: **III Simpósio sobre Micos-Leões, Livro de Resumos**. Teresópolis, 2003. p. 65.

PRATI, R.C. Novas abordagenns em apredizado de máquina para a geração de regras, classes desbalanceadas e ordenação de casos. São Carlos: Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC-USP), 2006. Tese (Doutorado em Ciências da Computação e Matemática Computacional). 167 p.

PRENTICE, I.C.; BARTLEIN, P.J.; WEBB III, T. Vegetation and climate changes in eastern North America since the last glacial maximum: a response to continuous climatic forcing. **Ecology**, v. 72, p. 2038–2056, 1991.

PRESS, F.; SIEVER, R. **Earth**. 2ª ed. San Francisco, CA: W. H. Freeman and Co., 1978. 649 p.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **Entre o tempo e a eternidade**. Lisboa: Gradiva, 1990.

PULLIAM, R. On the relationship between niche and distribution. **Ecol. Lett.**, v. 3, p. 349–361, 2000.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. **Remote Sensing and the Environment**, v. 48, p. 119-126, 1994.

RAHBEK, C.; GRAVES, G.R. Multiscale assessment of patterns of avian species richness. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 98, p. 4534–4539, 2001.

RANGEL, T.F.L.V.B; DINIZ-FILHO, J.A.F; BINI, L.M. Towards an integrated computational tool for spatial analysis in Macroecology and Biogeography. **Global Ecology and Biogeography**, v. 15, p. 321-327, 2006.

RASTETTER, E.B.; KING, A.W.; COSBY, B.J.; HORNBERGER, G.M. *et al*. Aggregating fine-scale ecologicalknowledge to model coarser-scale attributes of ecosystems. **Ecological Applications**, v. 2, p. 55-70, 1992.

RAXWORTHY, C.J.; MARTÍNEZ-MEYER, E.; HORNING, N.; NUSSBAUM, R.A. *et al*. Predicting distributions of known and unknown reptile species in Madagascar. **Nature**, v. 426, p. 837–841, 2003.

RAYMO, M.E. Global climate change: A three million year perspective. *In*: KUKLA, G.J.; WENT, E. (eds.). **Start of a Glacial**. Heidelberg, Germany: Springer, 1992. p. 207-223. (NATO ASI Series, v. 13).

RAYMO, M.E. The timing of major climate terminations. **Paleoceanography**, v. 12, p. 577-585, 1997.

RAYMO, M.E.; GANLEY, K.; CARTER, S; OPPO, D.W.; MCMANUS, J. Millennialscale climate instability during the early Pleistocene epoch. **Nature**, v. 392, p. 699–702, 1998.

RAYMO, M.E.; OPPO, D.W.; CURRY, W. The mid-Pleistocene climate transition: A deep-sea carbon isotopic perspective. **Paleoceanography**, v. 12, p. 546–559, 1997.

RECKNAGEL, F. (ed.). **Ecological Informatics: Understanding Ecology by Biologically-Inspired Computation**. New York: Springer, 2003. 398 p.

REID, W.V.; MOONEY, H.A.; CROPPER, A.; CAPISTRANO, D. *et al*. **Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report (Final Draft).** New York: United Nations Environment Programm, 2005. 219 p.

RICE , N.H.; MARTÍNEZ-MEYER, E.; PETERSON, A.T. Ecological niche differentiation in the *Aphelocoma* jays: a phylogenetic perspective. **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 80, p. 369–383, 2003.

RICH, E.; KNIGHT. K. **Inteligência Artificial**. São Paulo: Makron Books, 1993.

RICHARDS, J.A. **Remote sensing digital image analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 1986.

RICHARDS, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. Springer-Verlag, 1993.

RICKLEFS, R.E. Speciation and diversity: the integration of local and regional processes. *In*: OTTE, D.; ENDLER, J.A. **Speciation and its consequences**. Sunderland, MA: Sinauer, 1989.

RIPPLE, W.; BRADSHAW, G.A.; SPIES, T.A. Measuring forest landscape patterns in Cascade range of Oregon, USA. **Biological Conservation**, v. 57, p. 73-88, 1991.

RIZZINI, C.T. **Tratado de fitogeografía do Brasil, aspectos sociológicos e florísticos**. 2 v., São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1979.

RODRIGUES, M.G. **Análise do status de conservação das unidades da paisagem do complexo estuarino-lagunar de Iguape-Cananéia-Guaraqueçaba**. Universidade de São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado em Ecologia).

ROJSTACZER, S.; STERLING, S.M.; MOORE, N.J. Human appropriation of photosynthesis products. **Science**, v. 294, p. 2549-2552, 2001.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation índices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, p. 95-107, 1996.

ROOT, T.L.; MACMYNOWSKI, D.P.; MASTRANDREA, M.D.; SCHNEIDER, S.H. Human-modified temperatures induce species changes: joint attribution. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA**, v. 102, p. 7465-7469, 2005.

ROOT, T.L.; PRICE, J.T.; HALL, K.R.; SCHNEIDER, S.H. *et al*. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. **Nature**, v. 421, p. 57-60, 2003.

ROUSE JR., J.W.; HAAS, R.H.; DEERING, D.W.; SCHELL, J.A.; HARLAN, J.C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. Greenbelt, MD: NASA, 1974. (NASA/GSFC Type III Final Report, n. 371).

ROY, P.S.; COWELL, P.J.; FERLAND, M.A.; THOM, B.G. Wave–dominated coasts. *In*: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C.D. (eds.). **Coastal evolution: late quaternary shoreline morphodynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. p. 121-186.

RUDDIMAN, W.F. **Earth's climate: past and future**. New York: W.H. Freeman & Co., 2001. 465 p.

RUSHTON, S.P.; ORMEROD, S.J.; KERBY, G. New paradigms for modelling species distributions? **Journal of Applied Ecology**, v. 41, n. 193-200, 2004.

SALA, O.E.; CHAPIN III, F.S.; ARMESTO, J.J.; BERLOW *et al*. Global biodiversity scenarios for the year 2100. **Science**, v. 287, p. 1770-1774, 2000.

SALTHE, S.N. **Evolving hierarchical systems: their structure and representation**. New York: Columbia University Press, 1985.

SALTHE, S.N. Two forms of hierarchytheory in western discourses. **International Journal of General Systems**, v. 18, p. 251-264, 1991.

SÁNCHEZ-CORDERO, V.; CIRELLI, V.; MUNGUÍA, M.; SARKAR, S. Place prioritization for biodiversity representation using species' ecological niche modeling. **Biodiversity Informatics**, v. 2, p. 11-23, 2005.

SARMIENTO, G. **Los ecosistemas y la ecósfera**. Barcelona: Ed. Blume, 1984. 272 p. (Col. Blume Ecologia).

SCHAEFFER-NOVELLI Y.; CINTRON-MOLERO, G.; SOARES, M.L.G.; DE-ROSA, T. Brazilian mangroves. **Aquatic ecosystem health and management,** v. 3, p. 561-570, 2000.

SCHAMBERGER, M.; O'NEIL, L. Concepts and constrains of habitat-model testing. *In*: VERNER, J.; MORRISON, M.; RALPH, J. (eds.). **Wildlife 2000**. Madison, Wisconsin: The University of Wisconsin Press, 1986. p. 177-182.

SCHARLEMANN, J.P.W.; GREEN, R.E.; BALMFORD, A. Land-use trends in endemic bird areas: Global expansion of agriculture in areas of high conservation value. **Global Change Biol.**, v. 10, p. 2046-2051, 2004.

SCHMIEDER, F.; VON DOBENECK, T.; BLEIL, U. The Mid-Pleistocene climate transition as documented in the deep South Atlantic Ocean: initiation, interim state and terminal event. **Earth and Planetary Sciences Letters**, v. 179, p. 539-549, 2000.

SCOTT, J.M.; DAVIS, F.; CSUTI, B.; NOSS, R. *et al*. Gap Analysis: A geographic approach to protection of biological diversity. **Wildlife Monographs**, n. 123, 1993.

SEGURADO, P.; ARAÚJO, M.B. An evaluation of methods for modelling species distributions. **Journal of Biogeography**, v. 31, p. 155-1568, 2004.

SEVERINGHAUS, J.P.; BROOK, E.J. Abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice. **Science**, v. 286, p. 930-934, 1999.

SHAFER, G. **A mathematical theory of evidence**. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1976.

SHANNON, C.; WEAVER, W. **A teoria matemática da comunicação**. São Paulo: Difel, 1975.

SHAROV, A. **Models as analytical tools**. Disponível em <http://www.gypsymoth.ento.vt.edu/~sharov/popecol/lec1/model.html>. Arquivo consultado em 13 out. 2000.

SHIMABUKURO, Y.E.; NOVO, E.M.; PONZONI, F.J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 33, n. especial, p. 1729-1737, 1998.

SHUGART, H.H. **Terrestrial ecosystems in changing environments**. Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1998. 537 p.

SILVA, J.G.; SOMNER, G.V. A vegetação da restinga na Barra de Maricá, R.J. *In*: LACERDA, L.D.; ARAÚJO, D.S.S.; CERQUEIRA, R.; TURCQ, B. (orgs.). **Restingas: Origem, Estrutura, Processos**. Niterói: CEUFF, 1984. p. 285-304.

SILVA, S.M. **Avaliação e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade da zona costeira e marinha: diagnóstico das restingas no Brasil**. Disponível em <http://www.bdt.org.br/workshop/costa/restinga.htm>. Arquivo consultado em 20 abr. 2002.

SIMON, H.A. The architecture of complexity. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 106, p. 467-482, 1962.

SIMON, H.A. The organization of complex systems. *In*: PATTEE, H.H. (ed.). **Hierarchy theory: the challenge of complex systems**. New York: George Braziller, 1973. p. 1-27.

SIMON, H.A. **The sciences of the artificial**. 3ª ed. Cambridge: The MIT Press, 1996.

SIQUEIRA, M.F. **Uso de modelagem de nicho fundamental na avaliação do padrão de distribuição geográfica de espécies vegetais**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005. 107 p. Tese (Doutorado).

SKIDMORE, A.K.; TURNER, B.J. Forest mapping accuracies are improved using a supervised nonparametric classifier with SPOT data. **Photogrametric Engineering & Remote Sensing**, v. 54, n. 10, p. 1415-1421, 1988.

SKLAR, F., CONSTANZA, R. The development of dynamic spatial models for Landscape Ecology: a review and prognosis. *In*: TURNER, M., GARDNER, R. (eds.). **Quantitative methods in Landscape Ecology**. New York: Springer-Verlag, 1991. p.239-288.

SKOLE, D.; TUCKER, C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: Satellite data from 1978 to 1988. **Science**, v. 260, p. 1905-1910, 1993.

SOARES-FILHO, B.S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. São Paulo: Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, 1998. 299 p. Tese (Doutorado).

SOBERÓN, J.; PETERSON, A.T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. **Biodiversity Informatics**, v. 2, p. 1–10, 2005.

SOBERÓN, J. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. **Ecology Letters**. (no prelo).

SOKAL, R. Classification: purposes, principles, progress, prospects. **Science**, v. 185, n. 4157, p. 111-123, 1974.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. **Biometry**. 2ª ed. San Francisco: Freeman, 1981.

SOLBRIG, O.T. (ed.). **From genes to ecosystems: a research agenda for Biodiversity**. Report of a IUBS – SCOPE – UNESCO Workshop, Harvard Forest, Petersham, Mass., USA. 27 de junho a 1 de julho, 1991. Cambridge, Mass.: IUBS, 1991. 123 p.

SOUZA, M.C. **Mapeamento da planície costeira e morfologia e dinâmica das praias do município de Itapoá, estado de santa Catarina: subsídios à ocupação**. Curitiba: Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, 1999. 196 p. Dissertação (Mestrado em Geologia).

SOUZA, M.C. **Estratigrafia e evolução das barreiras holocênicas paranaenses, sul do Brasil**. Curitiba: Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, 2005. 95 p. Tese (Doutorado em Geologia).

STEWART, J.B.; ENGMAN, E.T.; FEDDES, R.A.; KERR, Y. (eds.). **Scaling up in hydrology using remote sensing**. Chichester: Wiley, 1996.

STINE, S. Extreme and persistent drought in California and Patagonia during Medieval time. **Nature**, v. 369, p. 546-549, 1994.

STOCKWELL, D.R.B. Genetic algorithms II. *In*: FIELDING, A.H. **Machine learning methods for ecological applications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. p. 123-144.

STOCKWELL, D.R.B.; NOBLE, I.R. Induction of sets of rules from animal distribution data: A robust and informative method of analysis. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 33, p. 385-390, 1992.

STOCKWELL, D.R.B.; PETERS, D.P. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. **International Journal of Geographic Information Systems**, v. 13, p. 143-158, 1999.

STRAHLER, A.N.; STRAHLER, A.H. **Environmental Geoscience: interaction between natural systems and man**. New York: John Wiley and Sons, 1973. 511 p.

SUGUIO, K. **Geologia do Quaternário e mudanças ambientais**. São Paulo: Paulo′s Comunicação e Artes Gráficas, 2001. 366 p.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. Brazilian coastline quaternary formations the States of São Paulo and Bahia littoral zone evolutive schemes. **Anais Academia Brasileira Ciências**, v. 48 (suplemento), p. 325-334, 1976.

SUGUIO, K.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; DOMINGUEZ, J.M.L. *et al*. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 15, n. 4, p. 273-286, 1985.

SUGUIO, K.; TESSLER, M.G. **Depósitos quaternários da planície costeira de Cananéia-Iguape (SP)**. São Paulo: Instituto Oceanográfico de São Paulo, 1992. p. 1-33. (Publicação Esp. do Inst. Oceanogr. São Paulo, v. 9).

SUTTON, R.S.; BARTO, A.G. **Reinforcement learning: an introduction**. Cambridge: MIT Press, 1998.

SWETS, J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. **Science**, v. 240, n. 4857, p. 1285-1293, 1988.

SWIFT, D.J.P; THORNE, J.A. Sedimentation on continental margins, I: a general model for shelf sedimentation. *In*: SWIFT D.J.P.; OERTEL, G.F.; TILLMAN, R.W.; THORNE J.A. (eds.). **Shelf sand and sandstone bodies: geometry, facies and sequence stratigraphy**. Oxford: Oxford Blackwell Scientific Publications, 1991. p. 3-31. (Special publications of the International Association of Sedimentologists, n. 14).

TERMANSEN, M.; MCCLEAN, C.J.; PRESTON, C.D. The use of genetic algorithms and Bayesian classification to model species distributions, **Ecological Modelling**, v. 192, p. 410–424, 2006.

THIAM, A.; EASTMAN, J.R. Vegetation Indices. *In*: EASTMAN, J.R. (ed.). **IDRISI Kilimanjaro - Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: Clark Labs, Clark University, 2003. 328 p.

THOM, R. **Structural stability and morphogenesis: an outline of a general theory of models**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.

THOMAS, C.D.; CAMERON, A.; GREEN, R.E.; BAKKENES, M. *et al*. The spatial structure of populations. **Journal of Animal Ecology**, v. 68, p. 647-657, 1999.

THOMPSON, M. A standard land-cover classification for remote-sensing applications in South Africa. **South African Journal of Science**, v. 92, p. 34-42, 1996.

THUILLER, W. BIOMOD: Optimising predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. **Global Change Biology**, v. 9, p. 1353-1362, 2003.

THUILLER, W. Patterns and uncertainties of species - range shifts under climate change. **Global Change Biology**, v. 10, p. 2020-2027, 2004.

THUILLER, W.; ARAÚJO, M.B.A.; LAVOREL, S. Do we need land-cover data to model species distributions in Europe? **Journal of Biogeography**, v. 31, p. 353–361, 2004.

THUILLER, W.; LAVOREL, S.; ARAÚJO, M.B.; SYKES, M.T.; PRENTICE, I.C. Climate change threats to plant diversity in Europe. **Proc. Nat. Acad. Sc. USA**, v. 102, p. 8245-8250, 2005a.

THUILLER, W.; LAVOREL, S.; SYKES, M.T.; ARAÚJO, M.B. Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe. **Diversity and Distributions**, v. 12, p. 49-60, 2006a.

THUILLER, W.; MIDGLEY, G.F.; ROUGET, M.; COWLING, R.M. Predicting patterns of plant species richness in megadiverse South Africa. **Ecography**, v. 29, p. 733-744, 2006b.

THUILLER, W.; RICHARDSON, D.M.; PYSEK, P.; MIDGLEY, G.F.; HUGHES, G.O.; ROUGET, M. Niche-based modelling as a tool for predicting the risk of alien plant invasions at a global scale. **Global Change Biology**, v. 11, p. 2234-2250, 2005b.

THUILLER, W.; RICHARDSON, D.M.; ROUGET, M.; PROCHE; WILSON, J.R.U. Interactions between environment, species traits, and human uses describe patterns of plant invasions. **Ecology**, v. 87, p. 1755-1769, 2006c.

THUILLER, W.; VAYDERA, J.; PINO, J.; SABATÉ, S. *et al*. Large-scale environmental correlates of forest tree distributions in Catalonia (NE Spain). **Global Ecology & Biogeography**, v. 12, p. 313-325, 2003.

TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Econ. Geogr.**, v. 46, p. 234-240, 1970.

TOBLER, W. "Cellular geography". *In*: GALE, S.; OLSSON, G. (ed.). **Philosophy in geography**. Dordrecht: Reidel Publishing Co., 1979. p 379-386.

TOWNSHEND, J.R.G. (ed.). **Improved global data for land applications**. Stockholm: IGBP Secretariat/Royal Swedish Academy of Sciences, 1992. (IGBP Report, n. 20).

TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.O. Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 9, p. 187-236, 1988.

TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.O. Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 351-359, 2002.

TUCKER, C.J.; TOWNSHEND, J.R.G. Strategies for tropical forest deforestation assessment using satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, p. 1461-1472, 2000.

TURNER, M.G. Landscape Ecology: the effect of pattern on process. **Annu. Rev. Ecol. Syst**., v. 20, p. 171-197, 1989.

TURNER, M.G.; DALE,V.H.; GARDNER, R.H.. Predicting across scales: theory development and testing. **Landscape Ecology** 3:245-252, 1989.

TURNER, M.G.; ARTHUAD, G.J.; ENGSTROM, R.T.; HEIL, S.J. *et al.* Usefulness of spatially explicit population models in land management. **Ecological Applications**, v.5, n.1, p.12-16, 1995.

TURQ, B.; MARTIN, L.; FLEXOR, J. M.; SUGUIO, K. *et al*. *In*: KNOPPERS, B.; BIDONE, E.D.; ABRÃO, J.J. (eds.). **Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil**. Niterói: UFF/FINEP, 1999. p. 25-46. (Serie Geoquímica Ambiental, n. 6).

UEXKULL, T. A stroll through the world of animals and men. **Semiotica**, Special Issue, v. 89, n.4, 237p., 1992.

USDA (United States Department of Agriculture). **Soil taxonomy - A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys**. 2ª ed. Washington, DC: Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, 1999. (Agric. Handbook, n. 436).

UYEMOV, A. Problem of direction of time and the laws of system's development. *In*: KUBAT, L.; ZEMAN, J. (eds.). **Entropy and information in science and philosophy**. Praga: Elsevier Scient. Publ. Co., 1975. p. 93-102.

VALERIANO, M.M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004, 72 p. (INPE-10550-RPQ/756).

VALERIANO, M.M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005. *In*: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2005, p. 3595-3602.

VAN GARDINGEN, P.R.; FOODY, G.M.; CURRAN, P.J. (eds.). S**caling-up: from cell to landscape**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

VELOSO, H.P. Sistema Fitogeográfico. *In*: IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manual técnico da vegetação brasileira**, **1**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. p. 9-38. (Manuais Técnicos em Geociências).

VERBEYLEN, G.; DE BRUYN, L.; ADRIAENSEN, F.; MATTHYSEN, E. Does matrix resistance influence red squirrel (*Sciurus vulgaris* L. 1758) distribution in an urban landscape? **Landscape Ecology**, v. 18, n. 8, p. 791-805, 2003.

VERNER, J.; MORRISON, M.L.; RALPH, C.J. (eds.). **Wildlife 2000: modeling habitat relationships of terrestrial vertebrates**. Madison: Univ. Wisconsin Press, 1986. 470 p.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A. *et al*. Geology of the Rio Grande do Sul coastal province. *In*: Rabassa, J. (ed.). **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**. Rotterdam: Balkema 4, 1986. p. 79-97.

VITOUSEK, P.M.; MOONEY, H.A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J.M. Human domination of Earth's ecosystems. **Science**, v. 277, p. 494-499, 1997.

VON NEUMANN, J. **The general and logical theory of automata**. New York: Simon & Schuster, 1956.

WALLACE, A.R. **Tropical nature and other essays**. London: Macmillan, 1878.

WALTHER, G.R.; BERGER, S.; SYKES, M.T. An ecological ''footprint'' of climate change. **Proc. Roy. Soc. London B.**, v. 272, p. 1427–1432, 2005.

WARNE, G.A.; MEADE, R.H.; WHITE, W. A.; GUEVARA, E.H.; GIBEAUT, J.; SMYTH, R.C.; ASLAN, A.; TREMBLAY, T. Regional controls on geomorphology, hydrology and ecosystem integrity in the Orinco Delta, Venezuela. **Geomorphology,** v. 44, p. 273-307, 2002.

WATSON, D.E.; SCHWARTZ, G.E.R.; RUSSEK, L.G.S. The theory of enformed systems: A paradigm of organization and holistic systems. **The Noetic Journal**, v. 2, n. 2, p. 159-172, 1999.

WATT, A.S. Pattern and process in the plant community. **Journal of Ecology**, v. 35, 1947.

WEAVER, W. Science and complexity. **American Scientist**, v. 36, p. 536-544, 1948.

WEBB III, T. Is vegetation in equilibrium with climate? How to interpret late-Quaternary pollen data. **Vegetatio**, v. 67, p. 75-91, 1986.

WEBB III, T. Glacial and Holocene vegetation history: Eastern North America. *In*: WEBB III, T. (ed.). **Vegetation history**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, 1988. p. 385-414.

WEINBERG, G.M. **An introduction to general systems thinking**. New York: John Wiley & Sons, 1975.

WIENER, N. **Cybernetics or control and communication in the animal and the machine.** Cambridge, MA: Paris, Hermann et Cie - MIT Press, 1948.

WESSELS, K.J.; De FRIES, R.S.; DEMPEWOLF, J.; ANDERSON, L.O. *et al*. Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation: Examples from the Greater Yellowstone Ecosystem, USA and Pará State, Brazil. **Remote Sensing of Environment** , v. 92 , p. 67-83, 2004.

WHITTAKER, R.H. Evolution of diversity in plant communities. **Brookhaven Symp. Biol.,** v. 22, p. 178-198, 1969.

WHITTAKER, R.J.; ARAÚJO, M.B.; JEPSON, P.; LADLE, R.J. *et al*. Conservation biogeography: assessment and prospect. **Diversity and Distributions**, v. 11, p. 3-23, 2005.

WHITTAKER, R.H.; LEVIN, S.A.; ROOT, R.B. Niche, habitat, and ecotope. **American Naturalist,** v. 107, p. 321-338, 1973.

WHITTAKER, R.J.; WILLIS, K.J.; FIELD, R. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity. **Journal of Biogeography**, v. 28, p. 453–470, 2001.

WIENER, N. **Cybernetics or control and communication in the animal an the machine**. Paris: Hermann, 1948.

WIENS, J.A. Spatial scaling in ecology. **Functional Ecology**, v. 3, p. 385-397, 1989.

WILCOVE, D.S.; ROTHSTEIN, D.; DUBOW, J.; PHILLIPS, A.; LOSOS, E. Quantifying threats to imperiled species in the United States. **Bioscience**, v. 48, p. 607-615, 1998.

WILLIAMS, J.W.; POST, D.M.; CWYNAR, L.C.; LOTTER, A.F.; LEVESQUE, A.J. Rapid and widespread vegetation responses to past climate change in the North Atlantic region. **Geology**, v. 30, n. 11, p. 971-974, 2002.

WILLIAMS, J.W.; SHUMAN, B.N.; WEBB III, T. Dissimilarity analyses of late-Quaternary vegetation and climate in eastern North America. **Ecology**, v. 82, p. 3346–3362, 2001.

WILLIAMS, J.W.; SHUMAN, B.N.; WEBB III, T.; BARTLEIN, P.J.; LEDUC, P.L. Late-Quaternary vegetation dynamics in North America: scaling from taxa to biomes. **Ecological Monographs**, v. 74, n. 2, p. 309–334, 2004.

WILLIS, K.J.; ARAÚJO, M.B.; BENNETT, K.D.; FIGUEROA-RANGEL, B. *et al*. How can a knowledge of the past help to conserve the future? Biodiversity conservation and the relevance of long-term ecological studies. **Phil. Trans. R. Soc. B.** (no prelo, a).

WILLIS, K.J.; BIRKS, H.J.B. What is natural? The need for a long-term perspective in biodiversity conservation. **Science**, v. 314, p. 1261-1265, 2006.

WILLIS, K.J.; GILLSON, L.; KNAPP, S. Biodiversity hotspots through time: an introduction. **Phil. Trans. R. Soc. B.** (no prelo, b).

WILLIS, K.J.; WHITTAKER, R.J. Species diversity-scale matters. **Science**, v. 295, p. 1245-1248, 2002.

WITHERS, M.; MEENTEMEYER, V. Concepts of scale in Landscape Ecology. *In*: KLOPATEK, J.M.; GARDNER, R.H. (eds.). **Landscape ecological analysis: issues and applications**. New York: Springer, 1999. p. 205-252.

WOLFRAM, S. (ed.). **Theory and applications of cellular automata**. Singapore: World Scientific, 1983.

WU, J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. **Landscape Ecology**, v. 19, p. 125-138, 2004.

WU, J. Scale and scaling: a cross-disciplinary perspective. *In*: WU, J.; HOBBS, R. (eds.). **Key Topics in Landscape Ecology**. Cambridge: Cambridge University Press. (no prelo).

WU, J.; QI, Y. Dealing with scale in landscape analysis: an overview. **Geographic Information Sciences**, v. 6, n. 1, p1-5, 2000.

XAVIER-DA-SILVA, J. Metodologia de Geoprocessamento. **Revista de Pós-graduação em Geografia**, v. 1, p. 25-34, 1997.

YEE, T.W.; MITCHELL, N.D. Generalized additive models in plant ecology. **Journal of Vegetation Science**, v. 2, p. 587-602, 1991.

ZACHOS, J.C.; PAGANI, M.; SLOAN, L.; THOMAS, E.; BILLUPS, K. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. **Science**, v. 292, p. 686–693, 2001.

ZADEH, L. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.

ZAR, J.H. **Biostatistical Analysis**. 4ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 663 p.

ZEEMAN, E.C. **Catastrophe Theory - Selected Papers 1972-1977**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977.

ZONNEVELD, I.S. The land unit - A fundamental concept in landscape ecology, and its applications. **Landscape Ecology,** v. 3, p. 67-86, 1989.

ZUNINO, M. A new concept of theoretical biogeography: the “nemophoront”. *In*: SOBTI, K.; YADAV, J.S. (eds.). **Some aspects of insect biology**. Punjab: Punjab Univ. Press., 1999. p. 109-113.

ZUNINO, M. El concepto de área de distribución: algunas reflexiones teóricas. *In*: MARTÍN-PIERA, F.; MORRONE, J.J.; MELIC, A. (eds.). **Hacia un Proyecto CYTED para el Inventario y Estimación de la Diversidad Entomológica en Iberoamérica: PrIBES-2000**. Zaragoza: SEA, 2000. p. 79-85. (Monografías Tercer Milênio, v. 1).

ZUNINO, M.; PALESTRINI, C. El concepto de especie y la biogeografía. **An. Biol. (Biol. Anim.)**, v. 17, n. 6, p. 85-88, 1991.

ZUNINO, M.; ZULLINI, A. **Biogeografía: La dimensión espacial de la evolución**. México, D.F: Fondo de Cultura Económica, 2003. 359 p.