



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA TERRA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ANDERSON MULULO SATO

INFLUÊNCIA DE PLANTIOS DE EUCALIPTO NA HIDROLOGIA E EROSÃO  
bacia do rio Sesmária, médio vale do rio Paraíba do Sul

Rio de Janeiro

2012

ANDERSON MULULO SATO

INFLUÊNCIA DE PLANTIOS DE EUCALIPTO NA HIDROLOGIA E EROSÃO  
bacia do rio Sesmaria, médio vale do rio Paraíba do Sul

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia na Área de Concentração de Planejamento e Gestão Ambiental.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Luiza Coelho Netto

Co-Orientador: Prof. Dr. André de Souza Avelar

Rio de Janeiro

2012

## CIP - Catalogação na Publicação

S253i Sato, Anderson Mululo  
Influência de plantios de eucalipto na hidrologia e erosão: bacia do rio Sesmaria, médio vale do rio Paraíba do Sul / Anderson Mululo Sato. - Rio de Janeiro, 2012.  
180 f.

Orientadora: Ana Luiza Coelho Netto.  
Coorientador: André de Souza Avelar.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2012.

1. Eucalipto. 2. Hidrologia. 3. Erosão. 4. Sesmaria. I. Coelho Netto, Ana Luiza, orient. II. Avelar, André de Souza, coorient. III. Título.

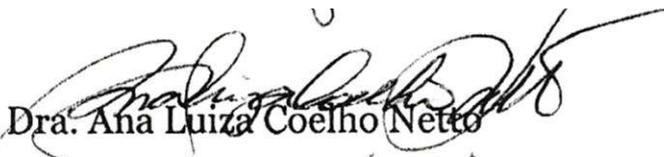
ANDERSON MULULO SATO

INFLUÊNCIA DE PLANTIOS DE EUCALIPTO NA HIDROLOGIA E EROSÃO  
bacia do rio Sesmaria, médio vale do rio Paraíba do Sul

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia na Área de Concentração de Planejamento e Gestão Ambiental.

Aprovada em 26/06/2012.

BANCA EXAMINADORA



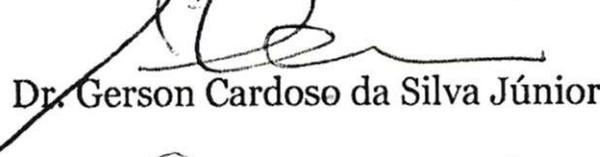
Dra. Ana Luiza Coelho Netto



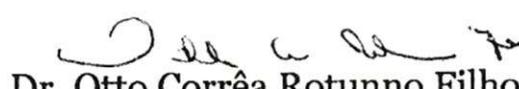
Dr. André de Souza Avelar



Dr. Antonio José Teixeira Guerra



Dr. Gerson Cardoso da Silva Júnior



Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho

À Isabella, à Renata e ao rebento que está por vir...

## **RESUMO**

A demanda por produtos florestais tem apresentado crescimento e o Brasil atualmente desponta como um dos principais produtores mundiais de plantios florestais. O médio vale do rio Paraíba do Sul (MVRPS) é a região que concentra a maior área e as maiores taxas de expansão da silvicultura no estado do Rio de Janeiro. Muitas dúvidas e sensos comuns sobre os impactos hidrológicos e erosivos do eucalipto carecem de embasamento científico. Logo, faz-se necessário estimular a discussão no meio científico para que estes pontos sejam esclarecidos, além de contextualizar estas discussões com a realidade regional do MVRPS. O objetivo geral deste trabalho é abordar a influência dos plantios de eucalipto na hidrologia e erosão, tomando como referência a bacia do rio Sesmaria (149 km<sup>2</sup>), uma bacia representativa da expansão da silvicultura do eucalipto no MVRPS. Especificamente, foram avaliados os impactos proporcionados pelas estradas não pavimentadas (ENPs) dos plantios na erosão; o comportamento, características e controles da oscilação do lençol freático em cabeceiras de drenagem com presença de plantios; a relação dos plantios com a ativação e desenvolvimento de voçorocas; além de simular as alterações hidrológicas provocadas pelas sucessivas alterações de uso e cobertura do solo desta região. Nesta bacia foram caracterizadas e monitoradas quatro estações hidrológicas em cabeceiras de drenagem com plantios de eucalipto e quatro estações nos principais rios da bacia. Os resultados indicaram que as ENPs contribuíram significativamente com sedimentos para os canais fluviais. A oscilação do lençol freático apresentou sincronismo nas áreas monitoradas, sugerindo a ocorrência de uma dinâmica regional por artesianismo relacionada com chuvas antecedentes de 120 dias. A implantação dos plantios coincidiu com a iniciação do processo de voçorocamento em uma cabeceira de drenagem adjacente aos plantios, enquanto outra voçoroca exibia indícios da ocorrência de fluxos subsuperficiais semelhantes ao observado em uma corte de estrada a jusante de um plantio de eucalipto. Os resultados obtidos a partir da modelagem hidrológica histórica apontaram que a substituição de pastagens pelo eucalipto apresentou impactos hidrológicos diferenciados de acordo com a escala espacial de análise: na escala ampla da bacia do rio Sesmaria foram identificados pequenos impactos hidrológicos e estes impactos tornam-se mais relevantes à medida que se analisa sub-bacias e cabeceiras de drenagem com maiores coberturas pelos plantios de eucalipto. Conclui-se que os plantios de eucalipto na bacia do rio

Sesmaria influenciam diretamente nos processos hidro-erosivos na escala de detalhe (cabeceiras de drenagem plantadas e cabeceiras adjacentes), tendo potencial de alterar a dinâmica erosiva em razão das ENPs e voçorocamentos induzidos por mudanças nos processos hidrológicos de encosta.

**Palavras-chave:** Eucalipto. Hidrologia. Erosão. Sesmaria.

## **ABSTRACT**

The demand for forest products has grown and Brazil is currently emerging as one of the world's leading producers of forest plantations. Middle Paraíba do Sul river valley (MPSRV) is the region that concentrates the largest area and the highest rates of forestry expansion in the state of Rio de Janeiro. Many doubts and common sense about the hydrological and erosive impacts of eucalyptus lack scientific basis. Therefore, it is necessary to stimulate discussion in the scientific community so that these points can be clarified, in addition to contextualizing these discussions with the regional reality of the MPSRV. The general objective of this work is to address the influence of eucalyptus plantations on hydrology and erosion, taking as reference the Sesmaria river basin (149 km<sup>2</sup>), a representative basin of the expansion of eucalyptus forestry in the MPSRV. Specifically, the impacts provided by the unpaved roads of the plantations on erosion; the behavior, characteristics and controls of water table oscillation in headwaters basins with plantations; the relationship between plantations and the activation and development of gullies; in addition to simulating the hydrological changes caused by the successive changes in land use and cover in this region. In this basin, four hydrological stations in headwaters with eucalyptus plantations and four stations in the main rivers of the basin were characterized and monitored. The results indicated that unpaved roads contributed significantly with sediments to the fluvial channels. The oscillation of the water table presented synchronism in the monitored areas, suggesting the occurrence of a regional dynamics by artesianism related to previous rains of 120 days. The implantation of the plantations coincided with the initiation of the gully process in a drainage basin adjacent to the plantations, while another gully showed signs of the occurrence of subsurface flows similar to that observed in a roadcut of an eucalyptus plantation. The results obtained from the historical hydrological modeling indicated that the replacement of pastures by eucalyptus presented differentiated hydrological impacts according to the spatial scale of analysis: in the broad scale of the Sesmaria river basin, small hydrological impacts were identified, and these impacts become more relevant as one analyzes sub-basins and drainage headwaters with greater coverage by eucalyptus plantations. It is concluded that eucalyptus plantations in the Sesmaria river basin directly influence the hydro-erosive processes at the detail scale (planted headwaters basins and adjacent

headwaters) having the potential to change the erosion dynamics due to unpaved roads and gullies induced by changes in hillside hydrological processes.

**Keywords:** *Eucalyptus*. Hydrology. Erosion. Sesmaria.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da área com plantios florestais no Brasil (adaptado de ABRAF, 2011).....	23
Figura 2 – O ciclo hidrológico. It = interceptação, Es+a = evaporação do solo e corpos d'água, T = transpiração. Modificado de Hewlett (1982). .....	29
Figura 3 – Rotas de fluxos nas encostas. FSH = fluxo superficial Hortoniano, FS = fluxo subterrâneo, FSSch = fluxo subsuperficial de chuva e FSSat = fluxo superficial de saturação. Dunne e Leopold (1978) modificado por Coelho Netto (2003). .....	30
Figura 4 – Representação de um hidrograma em resposta à chuva numa bacia de drenagem. Modificado de Fiering (1998). .....	31
Figura 5 – Representação do conceito de área de contribuição variável. As pequenas setas nos hidrogramas indicam como a vazão aumenta à medida que ocorre o aumento da área de contribuição das áreas saturadas, solos rasos e canais temporários. Este processo se reverte quando ocorre a redução da vazão. Modificado de Hewlett (1982).....	32
Figura 6 – Processo de infiltração numa encosta. e sua relação com o canal de drenagem. O diagrama mostra uma encosta com um canal na sua base, o lençol d'água e o gráfico de umidade do solo com a profundidade em três pontos. 0 é zero e $\theta_s$ umidade saturada. (A) Condição antes da chuva; FB é o fluxo de base. (B) Resposta inicial à chuva, sendo o sombreamento escuro o adicional de umidade. O fluxo subsuperficial de chuva (FSSch) é adicionado ao fluxo de base. (C) Na sequência da chuva o lençol sobe até a superfície na porção inferior da encosta e a zona saturada expande remontantemente. A água exfiltra como fluxo de retorno (FR), o qual, junto com a precipitação direta sobre a área saturada (PDsat), produz o fluxo superficial de saturação. Dunne e Leopold (1978) modificado por Coelho Netto (2003). .....	34
Figura 7 – Esquema de um aquífero não confinado (modificado de DUNNE e LEOPOLD, 1978). .....	35
Figura 8 – Tipos de aquíferos em função da condição de confinamento e posição no perfil do solo (modificado de Dunne e Leopold, 1978).....	37
Figura 9 – Relação da produção de água dos poços em função da profundidade. Cada cruz representa um poço levantado e a linha a produção mediana. Os dados de produção foram normalizados pela profundidade dos poços. A área em vermelho indica a faixa de ocorrência de saprolitos (modificado de Mortimer et al., 2011). .....	38
Figura 10 – Efeitos e manifestações do fluxo impulsionado pela gravidade em uma bacia de drenagem regional não-confinada (adaptado de Tóth, 1999).....	39
Figura 11 – Interação entre a precipitação e a vegetação. P: precipitação, ET: evapotranspiração, Ac: armazenamento nas copas, At: atravessamento e Ft: fluxo de tronco (extraído de Coelho Netto, 2003). .....	41
Figura 12 - Relação da precipitação diária (mm) e o atravessamento (%) junto aos troncos (cruzes azuis) e entre os troncos (círculos vermelhos) do eucalipto (extraído de Sato et al., 2011).....	43
Figura 13 – Esquema do experimento com bacias pareadas (modificado de Hewlett, 1982).....	50

Figura 14 – Variação máxima no deflúvio após o tratamento de desmatamento ou reflorestamento de uma porcentagem da área da bacia (extraído de Bacellar, 2005). .....	51
Figura 15 – Relação entre a evapotranspiração anual média e a precipitação anual média para diferentes coberturas vegetais (modificado de Zhang et al., 1999). .....	52
Figura 16 – Perfis característicos de umidade no solo e disponibilidade de água para as plantas. As linhas sólidas marcam o limite superior e inferior de conteúdo de água no solo. Os valores indicam a quantidade de água armazenada no solo (modificado de Zhang et al., 2010). .....	52
Figura 17 – Comparação da variação da disponibilidade de água segundo o modelo de Zhang e dados de experimentos em bacias pareadas com eucaliptos (modificado de Brown et al., 2005). .....	53
Figura 18 – Relação entre o consumo de água (evapotranspiração) e a produtividade (produção primária líquida) de ambientes florestas (pontos verdes), gramíneas (pontos amarelos) e vegetação mista (pontos pretos) (modificado de Schimel et al., 1997). .....	54
Figura 19 – (a) Relação entre a produtividade primária líquida acima do solo (PPL) e o uso da água. (b) relação entre a eficiência do uso da água (EUA) e o uso da água (modificado de Stape et al., 2004). .....	54
Figura 20 – Estimativa do balanço hídrico das florestas de Eucalyptus na bacia Maroondah/Austrália com 15, 30, 60, 120 e 240 anos de idade. É assumida uma precipitação anual de 1800 mm. Teuc representa a transpiração média anual do estrato arbóreo da floresta de Eucalyptus, Tsub indica a transpiração média anual do sub-bosque, Es indica a evaporação média anual do solo e da serrapilheira, I representa a interceptação média anual e Q a vazão média anual. Modificado de Vertessy et al. (2001). .....	62
Figura 21 – Transecto topográfico regional. Destacado em azul a bacia hidrográfica do rio Sesmaria. MVRPS: Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, BIG: Baía da Ilha Grande, EA: Escarpa Atlântica, PB: Planalto da Bocaina, EI: Escarpa Interior, DC: Domínio de Colinas, RPS: Domínio do Rio Paraíba do Sul, ES: Escarpa Sul. ....	71
Figura 22 – Modelo de evolução de concavidades estruturais controladas por fraturas na rocha proposto por Avelar e Coelho Netto (1992). .....	72
Figura 23 – Esquema de evolução regional alternando períodos de instabilidade morfodinâmica em resposta a mudanças climáticas globais na transição Pleistoceno-Holoceno e mais recentemente em função de alterações por ação humana (modificado de COELHO NETTO, 1999). .....	73
Figura 24 – Precipitação e temperatura média mensal no domínio colinoso e montanhoso do MVRPS (adaptado de SATO, 2008). .....	78
Figura 25 - Localização da bacia do rio Sesmaria (destacado em vermelho), próxima à bacia do rio Bananal. ....	80
Figura 26 – Mapa hipsométrico da bacia do rio Sesmaria. A numeração indica as estações de monitoramento hidrológico. ....	81
Figura 27 – Mapa geomorfológico da bacia do rio Sesmaria. A numeração indica as estações de monitoramento hidrológico. ....	82

Figura 28 – Mapa de uso e cobertura do solo da bacia do rio Sesmaria. A numeração indica as estações de monitoramento hidrológico. ....	83
Figura 29 – Mapa geológico da bacia do rio Sesmaria. ....	84
Figura 30 – Mapa hipsométrico da cabeceira de drenagem Caximonan 01. ....	88
Figura 31 – Mapa de uso e cobertura da cabeceira de drenagem Caximonan 01. FSI: floresta secundária inicial, FST: floresta secundária tardia. ....	88
Figura 32 – Mapa hipsométrico da cabeceira de drenagem Caximonan 02. ....	89
Figura 33 – Mapa de uso e cobertura da cabeceira de drenagem Caximonan 02. FSI: floresta secundária inicial. ....	89
Figura 34 – Mapa hipsométrico da cabeceira de drenagem Independência 01. ....	90
Figura 35 – Mapa de uso e cobertura da cabeceira de drenagem Independência 01. FSI: floresta secundária inicial. ....	90
Figura 36 – Mapa hipsométrico da cabeceira de drenagem Independência 02. ....	91
Figura 37 – Mapa de uso e cobertura da cabeceira de drenagem independência 02. FSI: floresta secundária inicial. ....	91
Figura 38 – Vertedor triangular de 90° instalado na estação Caximonan 01. ....	95
Figura 39 – Estação Caximonan 02. Esq.: cercado para proteção dos equipamentos (painel solar, pluviômetro, caixa estanque, dataloggers e sensores) ao lado do canal com visualização da régua linimétrica. Dir.: detalhe do sistema de aquisição de dados alimentado por bateria no interior da caixa estanque. ....	95
Figura 40 – Construção de seção de réguas linimétricas. Esq.: nivelamento topográfico da seção de réguas. Dir.: detalhe do RN (referência de nível). ....	96
Figura 41 – Medição da vazão a vau com utilização de micromolinete na estação rio São João. ....	100
Figura 42 – Esquema de cálculo da seção média (extraído de Santos et al., 2001). ....	101
Figura 43 – Desenho esquemático dos poços de monitoramento. ....	102
Figura 44 – Poço de monitoramento (P2) na estação Caximonan 02. ....	102
Figura 45 – Localização dos poços de monitoramento. ....	104
Figura 46 – Aceiro na cabeceira de drenagem Caximonan 01. ....	107
Figura 47 – Procedimento de georreferenciamento dos instrumentos por levantamento relativo estático. Esq.: estação base localizada no marco permanente 03. Dir.: detalhe do marco permanente. ....	109
Figura 48 – Indicação de uma saída d'água da ENP. ....	110
Figura 49 - Identificação e localização de uma saída d'água no interior do plantio. ....	111
Figura 50 – Rede de marcos permanentes (MP) e temporários (MT) para o delineamento das voçorocas. ....	114
Figura 51 – Levantamento do contorno das voçorocas com a utilização de estação total com o apoio da rede de marcos permanentes e temporários. Na foto, observa-se o levantamento do contorno da Voçoroca 02 a partir do marco temporário #11. ....	114

Figura 52 – Simulações da paisagem da bacia do rio Sesmária. Simulação 01: período pré-ciclo do café (esq.), Simulação 02: pós-ciclo do café (centro) e Simulação 03: condição atual (dir.).....	117
Figura 53 – Precipitação mensal das estações Sesmária, São João, Monte Alegre, Formoso, Feio e Barra. ....	118
Figura 54 – Precipitação mensal média das estações localizadas no domínio de colinas da bacia do rio Sesmária (Sesmária, São João, Monte Alegre, Formoso e Feio) na comparação com a precipitação média histórica. ....	119
Figura 55 – Diferença entre a precipitação mensal média das estações localizadas no domínio de colinas da bacia do rio Sesmária (Sesmária, São João, Monte Alegre, Formoso e Feio) em relação à precipitação média histórica do domínio de colinas do MVRPS. ....	120
Figura 56 – Precipitação mensal da estação localizada no domínio montanhoso da bacia do rio Sesmária (Barra) na comparação com a precipitação média histórica do domínio montanhoso do MVRPS. ....	121
Figura 57 – Diferença entre a precipitação mensal média das estações Sesmária, São João, Monte Alegre, Formoso, Feio e Barra e a precipitação média histórica do domínio de colinas do MVRPS.....	121
Figura 58 – Frequência de ocorrência de dias com e sem precipitação. ....	122
Figura 59 – Distribuição da precipitação diária em classes por estação.....	123
Figura 60 – Localização de saídas d'água das ENPs nas estações estudadas. ....	124
Figura 61 – Distância mínima entre as saídas d'água e a rede de drenagem. ....	126
Figura 62 – Variação temporal da carga de sedimentos por estação. ....	127
Figura 63 – Relação da carga de sedimentos com a precipitação do dia da coleta. ....	127
Figura 64 – Relação da reforma das ENPs com o aumento da carga de sedimentos na estação Caximonan 02. Esq.: em primeiro plano, observa-se o solo exposto revolvido e desagregado em virtude da reforma das ENPs, assim como a ocorrência de uma fuga d'água (seta azul), que direciona os fluxos para um ponto imediatamente a montante do vertedor. A seta vermelha indica a posição do pluviômetro e do datalogger. Dir.: limpeza do vertedor após o assoreamento em virtude do aumento da carga de sedimentos após a reforma das ENPs. ....	129
Figura 65 – Granulometria dos poços em relação à profundidade. ....	132
Figura 66 – Oscilação da profundidade do NA em todas as estações. No eixo x (temporal) também está indicada a idade dos plantios de eucalipto.....	133
Figura 67 – Oscilação da elevação do NA em todas as estações. No eixo x (temporal) também está indicada a idade dos plantios de eucalipto.....	133
Figura 68 – Oscilação da profundidade do NA normalizado em todas as estações com a indicação da mediana. No eixo x (temporal) também está indicada a idade dos plantios de eucalipto. ....	134
Figura 69 – Indicação da duração total dos períodos de estabilidade, subida e descida do NA a partir de comparações semanais.....	135

Figura 70 – Precipitação acumulada no período dos meses de setembro a março dos anos 2009-2010, 2010-2011 e 2011-2012. ....	136
Figura 71 – Distribuição da precipitação diária em classes por período. ....	136
Figura 72 – Variação semanal do NA normalizado em relação à precipitação semanal. ....	138
Figura 73 – Esq.: Relação da mediana do NA normalizado (P1 ao P11) com a precipitação acumulada de 30, 60, 90 e 120 dias. Dir.: correlação entre dos períodos de subida do NA em relação à precipitação acumulada de 30, 60, 90 e 120 dias. .	140
Figura 74 – Relação do NA dos poços e a cota dos rios em fluxo de base. ....	143
Figura 75 – Morfologia no local da estação rio Feio. Esq.: antes do dia 15 de março de 2010 (13/07/2008). Dir.: após o dia 15 de março de 2010 (24/03/2010). Notar a erosão das margens e a deposição de sedimentos grosseiros. A seta vermelha indica aproximadamente a elevação onde estavam instalados os pluviômetros, que foram arrastados pelo fluxo. Como escala, à esquerda da seta há uma caminhonete. ....	144
Figura 76 – Variação da elevação do NA nos poços P7 (fundo de vale) e P8 e P9 (encosta). A linha de diferença de elevação foi calculada a partir da diferença de elevação de P7 em relação à média de P8 e P9. ....	145
Figura 77 – Estação Independência 01 com a localização dos poços P7 (fundo de vale), P8 e P9 (encosta) e indicação do desnivelamento do NA no sentido do canal do rio Formoso. ....	145
Figura 78 – Situação da Voçoroca 01 (acima) e Voçoroca 02 (abaixo) no dia 07/02/2003. A linha vermelha delimita o contorno das voçorocas em 2012. ....	148
Figura 79 – Visualização geral da área de interesse em 07/02/2003. A seta vermelha indica a exportação de sedimentos. ....	149
Figura 80 – Situação da Voçoroca 01 (esq.) e 02 (dir.) em 2004. O brilho da imagem da Voçoroca 02 foi aumentado devido às áreas de sombra. ....	150
Figura 81 – Visualização geral da área de interesse em 2004, com o início dos plantios de eucalipto no lado esquerdo da imagem. A seta vermelha indica a exportação de sedimentos. ....	150
Figura 82 – Situação da Voçoroca 01 (esq.) e 02 (dir.) no dia 21/08/2010. A linha vermelha delimita o contorno das voçorocas em 2012. ....	151
Figura 83 – Visualização geral da área de interesse em 21/08/2010 com plantios de eucalipto no lado esquerdo da imagem. ....	151
Figura 84 – Voçoroca 01 retrabalhando os depósitos de fundo de vale (rampas). Ao fundo, observam-se os plantios de eucalipto. ....	153
Figura 85 – Dígitos da Voçoroca 02 nas encostas. Visão de montante para jusante. ....	153
Figura 86 – Fluxo de água corrente no Dígito 4 da Voçoroca 01. Foto tirada em 12/05/2011 no início do período de estiagem. ....	154
Figura 87 – Avanço dos dígitos da Voçoroca 02 para a alta encosta. Ao fundo observam-se os plantios de eucalipto. ....	155

Figura 88 – Feições de erosão por água subsuperficial no corte da estrada Queluz-Areias/SP (SP-058).....	156
Figura 89 – Alinhamento da Voçoroca 02 com a dobra antiformal (linha amarela com setas) mapeada por Eirado Silva (2006). ....	157
Figura 90 – Ocorrência de foliações subverticais com intercalações de bandas de quartzo na alta encosta, acima da Voçoroca 02.....	157

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dez países com maior área de plantios florestais para produção (1990 – 2005). Extraído da FAO (2006). .....	22
Tabela 2 – Tratamentos das estações nas cabeceiras de drenagem. ....	85
Tabela 3 - Parâmetros geomorfológicos das cabeceiras de drenagem. P: perímetro, ΔH: desnivelamento, Cc: comprimento de canais, G: gradiente da bacia, Dd: densidade de drenagem, Ic: índice de circularidade. ....	87
Tabela 4 – Uso e cobertura do solo das cabeceiras de drenagem. FSI: floresta secundária inicial, FST: floresta secundária tardia. ....	87
Tabela 5– Parâmetros dos plantios nas cabeceiras de drenagem. ID: idade, DAP: diâmetro à altura do peito médio (cm), H: altura média (m) HD: altura dominante (m) AB: área basal (m <sup>2</sup> /ha) IMA: incremento médio anual (m <sup>3</sup> /ha), V: volume de madeira (m <sup>3</sup> /ha). ....	87
Tabela 6 – Parâmetros mensurados nas estações de monitoramento. RP: Rios Principais CD: Cabeceiras de Drenagem .....	92
Tabela 9 – Informações sobre as estações de medição de precipitação. RP: rios principais, CD: cabeceiras de drenagem. ....	94
Tabela 8 – Classificação da série histórica das estações nos rios principais. SM: Sesmaria, SJ: São João, FM: Formoso, FE: Feio, C: completa, P: parcial, I: incompleta. ....	97
Tabela 9 – Situação da série histórica das estações nos rios principais após as correlações. SM: Sesmaria, SJ: São João, FM: Formoso, FE: Feio, C: completa, P: parcial, I: incompleta. ....	99
Tabela 10 – Informações sobre os poços de monitoramento. FS: fundo de vale, BME: baixa-média encosta, H: elevação do poço. ....	103
Tabela 11 – Coordenadas dos marcos permanentes obtidas pós-processamento. h: elevação elipsoidal/geométrica, H: elevação geoidal/ortométrica. ....	108
Tabela 12 – Coordenadas dos equipamentos e vértices temporários. h: elevação elipsoidal/geométrica, H: elevação geoidal/ortométrica. ....	109
Tabela 13 – Dados de precipitação das estações Sesmaria (SM), São João (SJ), Monte Alegre (MA), Formoso (FM), Feio (FE) e Barra (BR). Obs.: *: dados até o mês de março, **: dados a partir de 16 de junho de 2009. ....	118
Tabela 14 – Dados das ENPs por cabeceira de drenagem. AB: área da bacia, AE: área de estradas, CE: comprimento total de estradas, CD: cruzamentos das estradas com drenagens. SA: saídas d'água, DSA: distância média das saídas d'água em relação ao canal mais próximo, VCED: valor de conectividade estrada-drenagem (SA/DSA). ....	125
Tabela 15 – Dados de carga de sedimentos por estação. ....	127
Tabela 16 – Profundidade do NA nos poços por estação. ....	134
Tabela 17 – Variação semanal do NA dos poços (m) para acumulados semanais maiores que 100 mm. S.D.: sem dados. Obs.: o P11 apresentou-se sem dados por ter	

uma série histórica curta e que não coincidiu com os eventos de precipitação superiores a 100 mm. ....	137
Tabela 18 – Orientação de canais e orientação, densidade e comprimento de fraturas nas áreas de estudo Bela Vista, Três Barras e Bom Jardim (extraído de AVELAR e COELHO NETTO, 1992a).....	142
Tabela 19 – Evolução das voçorocas na comparação dos anos de 2003, 2010 e 2012. * Levantamento da Voçoroca 01 realizado em 10/3/2012 e da Voçoroca 02 em 19/4/2012.....	152
Tabela 20 – Balanço hídrico das simulações. Simulação 01: Pré-Ciclo do Café, Simulação 02: Pós-Ciclo do Café, Simulação 03: Condição Atual.....	158

## ***LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS***

MVRPS	Médio vale do rio Paraíba do Sul
ENP	Estrada não pavimentada
IMA	Incremento médio anual
VCED	Valor de conectividade estrada-drenagem
CS	Carga de sedimento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>26</b>
2.1 GERAIS	26
2.2 ESPECÍFICOS	26
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
3.1 O CICLO HIDROLÓGICO	27
3.2 HIDROLOGIA DE BACIAS DE DRENAGEM	29
3.3 ÁGUA SUBTERRÂNEA	35
3.4 VEGETAÇÃO NA REGULAÇÃO HIDROLÓGICA	40
3.5 O CONSUMO DE ÁGUA PELA VEGETAÇÃO	48
3.6 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS PLANTIOS DE EUCALIPTO	55
<b>4 ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>69</b>
4.1 MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL	69
4.1.1 Geologia	69
4.1.2 Geomorfologia	70
4.1.3 Histórico de cobertura do solo e processos erosivos	72
4.1.4 Características climáticas	77
4.2 BACIA DO RIO SESMARIA	78
4.3 CABECEIRAS DE DRENAGEM	85
<b>5 METODOLOGIA</b>	<b>92</b>
5.1 REDE DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO	92
5.2 PRECIPITAÇÃO	93
5.3 COTAS LINIMÉTRICAS E VAZÃO	94
5.4 OSCILAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO	101
5.5 PREPARAÇÃO DA BASE DIGITAL	106
5.6 ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS E CARGA DE SEDIMENTOS	110

5.7 <i>EVOLUÇÃO DE VOÇOROCAS</i>	113
5.8 <i>MODELAGEM HIDROLÓGICA HISTÓRICA</i>	115
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>118</b>
6.1 <i>PRECIPITAÇÃO</i>	118
6.2 <i>ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS E CARGA DE SEDIMENTOS</i>	123
6.3 <i>OSCILAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO</i>	130
6.4 <i>EVOLUÇÃO DE VOÇOROCAS</i>	147
6.5 <i>MODELAGEM HIDROLÓGICA HISTÓRICA</i>	158
<b>7 CONCLUSÕES</b>	<b>161</b>
<b>DESDOBRAMENTOS DA PESQUISA</b>	<b>163</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>167</b>

## 1 INTRODUÇÃO

---

A demanda por produtos florestais, como serrados, compensados, lenha, carvão, celulose e papel, foi estimulada pelo crescimento populacional e da economia global sendo os plantios florestais indicados como alternativa ao desmatamento de florestas nativas (WEST, 2006). Dentro das características da silvicultura moderna, muitos plantios florestais foram estabelecidos nos países do hemisfério Sul, como Brasil, África do Sul, Chile e Nova Zelândia, o que está promovendo modificações no padrão mundial de produção florestal (LIMA, 1996). Segundo West (2006), os plantios florestais, assim como quaisquer outras modalidades de agricultura, objetivam obter florestas altamente produtivas. A escolha de certas espécies do gênero *Eucalyptus* para a implantação de plantios florestais se justifica, principalmente, pela elevada taxa de crescimento, grande adaptabilidade das espécies e capacidade de rebrota. Segundo Stape *et al.* (2004), o melhoramento genético e as práticas silviculturais intensivas proporcionaram a triplicação da produtividade dos plantios de eucalipto nos últimos 40 anos, com incrementos médios anuais (IMA) superiores a 40 m<sup>3</sup>/ha, o que caracteriza estes agrossistemas como uns dos mais produtivos no mundo.

Os plantios florestais são definidos como florestas compostas basicamente por espécies exóticas estabelecidas através do plantio de mudas ou sementeira, sendo, geralmente, de uma única ou poucas espécies e de curta rotação. Mundialmente, estes plantios cobriam em 2005 uma área de aproximadamente 140 milhões de hectares e apresentaram uma taxa de crescimento anual de 2,6 milhões de hectares no período de 2000 a 2005, segundo dados da FAO (2006). Os plantios florestais podem ser sub-divididos em plantios florestais com finalidade primária de produção ou proteção. Plantios florestais com finalidade produtiva visam a produção de madeira, fibras, lenha ou outros produtos não-madeireiros (ex. alimentos, látex e forragem), enquanto os plantios florestais com finalidade de proteção almejam proteger o solo e a água, reabilitar áreas degradadas e conservar a diversidade biológica. Segundo Avaliação dos Recursos Florestais Mundiais 2005 elaborada pela FAO (2006), o Brasil despontava como o quarto país com a maior área de plantios florestais com finalidade produtiva, com uma área de 5,4 milhões de hectares e crescimento anual de 21 mil hectares no período de 2000 a 2005 (Tabela 1).

Tabela 1 – Dez países com maior área de plantios florestais para produção (1990 – 2005). Extraído da FAO (2006).

País	Área de Plantios Florestais para Produção (10 <sup>3</sup> ha)			Crescimento Anual (10 <sup>3</sup> ha)	Crescimento Anual (%)
	1990	2000	2005	2000-2005	2000-2005
China	17.131	21.765	28.530	1.353	5,6
EUA	10.305	16.274	17.061	157	0,9
Federação Russa	9.244	10.712	11.888	235	2,1
Brasil	5.070	5.279	5.384	21	0,4
Sudão	5.347	4.934	4.728	-41	-0,8
Indonésia	2.209	3.002	3.399	79	2,5
Chile	1.741	2.354	2.661	61	2,5
Tailândia	1.979	1.996	1.997	n.s.*	n.s.*
França	1.842	1.936	1.968	6	0,3
Turquia	1.459	1.763	1.916	31	1,7

\* n.s.: não significativo

Dados mais recentes da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2011) indicaram que o Brasil totalizava 6,5 milhões de hectares com plantios florestais de *Pinus* e *Eucalyptus* no ano de 2010, sendo que os plantios de eucaliptos representavam 73% e os de *Pinus* 27% desta área total (Figura 1). No período de 2005 a 2010 ocorreu um crescimento de aproximadamente 1,3 milhão de hectares da área plantada com eucaliptos no país, enquanto a área com plantios de *Pinus* apresentou decréscimo (aproximadamente -75 mil hectares). Dentre os estados brasileiros que apresentam plantios de eucalipto no ano de 2010, destacaram-se Minas Gerais (1.400.000 ha – 29,4% do plantio nacional), São Paulo (1.044.813 ha - 22% do plantio nacional) e Bahia (631.464 ha – 13,3% do plantio nacional), seguido por Mato Grosso do Sul (8,0% do plantio nacional), Rio Grande do Sul (5,7%) e Espírito Santo (4,3%). No Estado do Rio de Janeiro a área ocupada por plantios florestais era da ordem de 18.500 ha em 2009, sendo grande parte desta área representada por plantios de eucalipto (FIRJAN, 2009). Os dados deste estudo indicaram que o médio vale do rio Paraíba do Sul (MVRPS) era a região do estado do Rio de Janeiro que apresentava a maior área de silvicultura, com 8.587 ha plantados, o equivalente a 46,6% da área total de silvicultura. Informações trazidas por Vianna *et al.* (2007) e Sato *et al.* (2007) indicavam que os plantios de eucalipto foram expandidos no MVRPS com um padrão espacial de manchas isoladas numa matriz de pastagem com presença conjunta de fragmentos florestais, com taxa de expansão superior a 250 ha/ano no período de 2000 a 2007 entre as cidades de Queluz/SP e Volta Redonda/RJ.

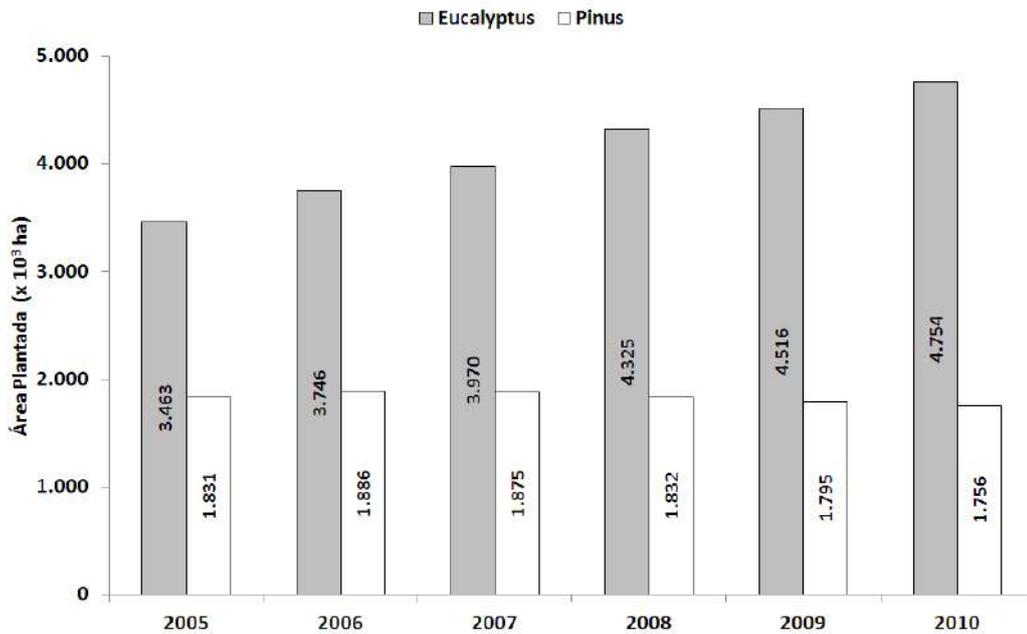


Figura 1 - Evolução da área com plantios florestais no Brasil (adaptado de ABRAF, 2011).

Os plantios de eucalipto existem no Brasil desde o final do século XIX, mas foi a partir dos programas de incentivos fiscais por parte do Estado brasileiro da década de 1960 que ocorreu grande estímulo à expansão dos plantios de eucalipto em várias regiões do país com crescentes questionamentos sobre seus impactos ambientais (LIMA, 1996). Estes questionamentos vão além do Brasil e são discutidos em âmbito mundial, conforme ressaltado por Poore e Fries (1985) e Lima (1996). Estes autores ressaltam que a maior parte dos questionamentos direcionados aos impactos ambientais dos plantios de eucalipto carece de fundamentação científica, muito embora estes acabem sendo levados em consideração nas tomadas de decisão.

No estado do Rio de Janeiro foi elaborada uma série de leis e decretos que buscam definir as regras para a implantação e expansão da silvicultura com ênfase na silvicultura do eucalipto, conforme indicado nas leis estaduais 4.063/2003 e 5067/2007, assim como no decreto 41.968/2009. Esta série de medidas reflete o embate atual sobre o tema no estado do Rio de Janeiro, com o interesse de pequenos, médios e grandes investidores em ampliar a área plantada e obter garantias para a exploração da atividade, enquanto ainda permanecem dúvidas e sentidos comuns sobre os potenciais impactos ambientais desta atividade.

No contexto da inserção do eucalipto no vale do rio Paraíba do Sul, o estudo de Abdalad *et al.* (2005) identificou as duas principais empresas que realizam esses plantios nessa região: a Votorantim Celulose e Papel (VCP), atual FIBRIA, e a

Nobrecel. Ambas possuem terras próprias e arrendadas, sendo que no ano de 2005 a FIBRIA respondia por uma área total de 73.600 ha, enquanto a área ocupada pela Nobrecel era 5,4 vezes menor (13.640 ha), referentes aos plantios voltados para as unidades do vale do rio Paraíba do Sul. Dados mais atualizados da FIBRIA do ano de 2010 para a unidade Jacareí/SP (região do vale do rio Paraíba do Sul), indicavam um aumento expressivo nas áreas próprias e arrendadas, totalizando 81.966 ha, o que resultou em um incremento de 8.366 ha (+11,4% em relação à 2005) no período de cinco anos (FIBRIA, 2011). Esses dados nos fazem refletir a respeito da tendência consistente de expansão da área com plantios de eucalipto.

Diante do crescimento da área plantada com *Eucalyptus* no MVRPS e da série de questionamentos acerca dos impactos hidrológicos e erosivos destes plantios, faz-se necessário estimular a discussão no meio científico para que estes pontos sejam esclarecidos, subsidiem as tomadas de decisão e a formulação de políticas públicas. Além disso, é necessário contextualizar estas discussões com a realidade do MVRPS, onde os plantios de eucalipto estão substituindo pastagens degradadas em um padrão espacial de manchas, conforme indicado por Vianna *et al.* (2007) e Sato (2008). Sendo assim, busca-se através deste trabalho avaliar a influência destes plantios nos processos hidrológicos e erosivos de quatro cabeceiras de drenagem, assim como nas respostas quantitativas nos principais rios de uma bacia de drenagem no MVRPS (bacia do rio Sesmaria). As questões a serem respondidas são as seguintes: 1) Como as diferenças no manejo florestal (manutenção de estradas) influenciam as respostas hidrológicas e erosivas de pequenas bacias de drenagem? 2) Quais são as influências destes plantios na dinâmica da água subterrânea e no fluxo dos canais de drenagem nas cabeceiras de drenagem e na bacia do rio Sesmaria? 3) Quais são as relações existentes entre os plantios de eucalipto e a evolução de erosões por água subterrânea?

A tese está dividida em sete capítulos, sendo no capítulo inicial apresentada a contextualização e a motivação deste trabalho. No capítulo dois foram apresentados os objetivos gerais e específicos, seguido pelo capítulo três que trata de uma revisão bibliográfica sobre aspectos hidrológicos e erosivos, com ênfase em referências sobre plantios de eucalipto. No quarto capítulo a área de estudo foi apresentada em diferentes escalas, partindo da escala regional do MVRPS, passando pela bacia do rio Sesmaria até chegar às cabeceiras de drenagem com cobertura por eucalipto estudadas. A metodologia da tese é detalhada no quinto capítulo, abordando os

materiais e métodos empregados para atingir os objetivos propostos. Os resultados foram apresentados e discutidos no capítulo seis seguindo basicamente a mesma ordem da metodologia visando facilitar a compreensão, e, por fim, o sétimo capítulo traz as conclusões deste trabalho e o oitavo e último capítulo traz algumas perspectivas para futuras pesquisas.

## **2 OBJETIVOS**

---

### 2.1 GERAIS

- Avaliar as possíveis alterações hidrológicas e erosivas decorrentes da implementação de plantios de eucalipto na bacia hidrográfica do rio Sesmaria, médio vale do rio Paraíba do Sul, na comparação de quatro cabeceiras de drenagem com diferentes espaçamentos;

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Mensurar a carga de sedimento exportada pelas cabeceiras de drenagem e relacioná-la com o manejo das estradas não pavimentadas dos plantios de eucalipto;
- Monitorar e relacionar a oscilação do lençol freático nas cabeceiras de drenagem com o desenvolvimento dos plantios de eucalipto e a dinâmica pluviométrica e fluvial;
- Avaliar a relação entre plantios de eucalipto com a evolução de erosões por água subterrânea (voçorocas);
- Relacionar as mudanças históricas de uso e cobertura do solo na paisagem da bacia do rio Sesmaria com as alterações hidrológicas e erosivas;

Importante destacar que inicialmente existia como objetivo comparar diferentes manejos dos plantios de eucalipto no pós-corte, que foi excluído do presente estudo em razão do atraso na previsão do corte dos plantios por questões de licenciamento indicadas na descrição da área de estudo (seção 4.3).

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

#### 3.1 O CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico, ou ciclo da água, é definido pelo conjunto de processos hidrológicos naturais que ocorrem em escala global permanentemente (KOBAYAMA *et al.*, 2011). Dentre os processos hidrológicos podemos destacar a evapotranspiração (evaporação + transpiração), condensação, precipitação, interceptação, infiltração e os escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo (KOBAYAMA *et al.*, 2008). Estes processos são relacionados com a circulação da água entre a atmosfera, solos, rochas, seres vivos e corpos hídricos (rios, lagos e oceanos) em diferentes estados físicos (sólido, líquido e gasoso). Como em todo ciclo, a definição do primeiro aspecto a ser analisado é arbitrária, sendo aqui iniciado pela precipitação.

A entrada de água no sistema da bacia de drenagem ocorre através das precipitações. Na hidrologia a precipitação é entendida como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre, seja ela através de chuva, neblina, granizo, geada, neve, entre outras formas (KOBAYAMA *et al.*, 2011). No caso das chuvas, as mesmas ocorrem a partir do momento em que o vapor d'água atmosférico atinge o ponto de saturação, ocorrendo o agrupamento de moléculas em núcleos de condensação e a formação de gotas. Para que essas gotas precipitem é necessário que tenham um volume tal que seu peso seja superior às forças que as mantêm em suspensão, adquirindo assim uma velocidade de queda superior às componentes verticais ascendentes dos movimentos atmosféricos (TUCCI e BERTONI, 2000).

Nos estudos hidrológicos as principais características da precipitação são o total, a duração e as distribuições espaciais e temporais, sendo que existem diversos mecanismos de formação das mesmas (TUCCI e BERTONI, 2000). O vapor d'água contido na atmosfera constitui um reservatório potencial de água que, ao condensar, solidificar ou sublimar, possibilita a ocorrência de precipitações. As precipitações ocorrem quando massas de ar úmidas sofrem ascensão devido às correntes de ar convectivas (precipitações convectivas), ou pela entrada de massas de ar quentes ou frias sobre ou sob outras massas de ar (precipitações frontais ou ciclônicas), ou então devido à ascensão de massas de ar no relevo (precipitações orográficas) (HEWLETT, 1982; TUCCI e BERTONI, 2000). Com relação à extensão, as chuvas podem ser

classificadas como regionais ou locais, dependendo da extensão espacial que atingem.

As chuvas regionais normalmente estão relacionadas com as precipitações frontais, mas alguns casos de precipitações convectivas que ocorrem na Amazônia também podem ser considerados de extensão regional. As precipitações regionais frontais são geradas por choques de massas de ar com diferentes características de temperatura e umidade, no qual a massa de ar mais quente é impulsionada para cima produzindo precipitações de longa duração, com intensidades de média à alta. No Brasil essas chuvas estão associadas aos avanços das massas de ar polares em direção às massas quentes e úmidas continentais.

Precipitações locais estão relacionadas com mecanismos convectivos ou orográficos. As precipitações convectivas geralmente ocorrem em regiões equatoriais, onde os ventos são fracos e os movimentos de ar são essencialmente verticais, sendo, geralmente, de alta intensidade (TUCCI e BERTONI, 2000). O mecanismo de ascensão de ar nas precipitações convectivas ocorre através do aquecimento diferenciado da superfície, gerando diferenças de pressão entre as áreas e a formação de células de convecção. Já as precipitações orográficas ocorrem quando massas de ar úmidas ascendem sobre alguma barreira topográfica, como cadeias montanhosas costeiras (HEWLETT, 1982), diminuindo dessa forma a temperatura à medida que a altitude aumenta, ocasionando a condensação do vapor d'água.

A precipitação que chega às bacias de drenagem segue por diversos caminhos, sendo importante para essa definição de trajetória uma gama de fatores. Parte da precipitação é retida pela vegetação e serrapilheira sendo posteriormente evaporada de volta para a atmosfera, processo esse chamado de interceptação. Outra parte infiltra no solo, sendo que dessa parcela uma parte é transpirada pela vegetação após a sua absorção pelas raízes, parte é armazenada no perfil do solo e outra parte percola o solo até recarregar as zonas saturadas. Uma certa quantidade de água também não chega a infiltrar no solo e escoar superficialmente em direção aos fundos de vales, que podem ou não apresentar canais de drenagem. A água que frequentemente está presente nos canais de drenagem provém daquela que escoou superficialmente, subsuperficialmente e/ou subterraneamente e daquela que precipitou diretamente sobre os canais. Parte dessa água presente nos corpos d'água, como os rios, lagos e oceanos, pode ser evaporada diretamente dos mesmos, fechando o ciclo hidrológico (Figura 2), sendo a radiação solar a fonte energética que mantém este ciclo operando.

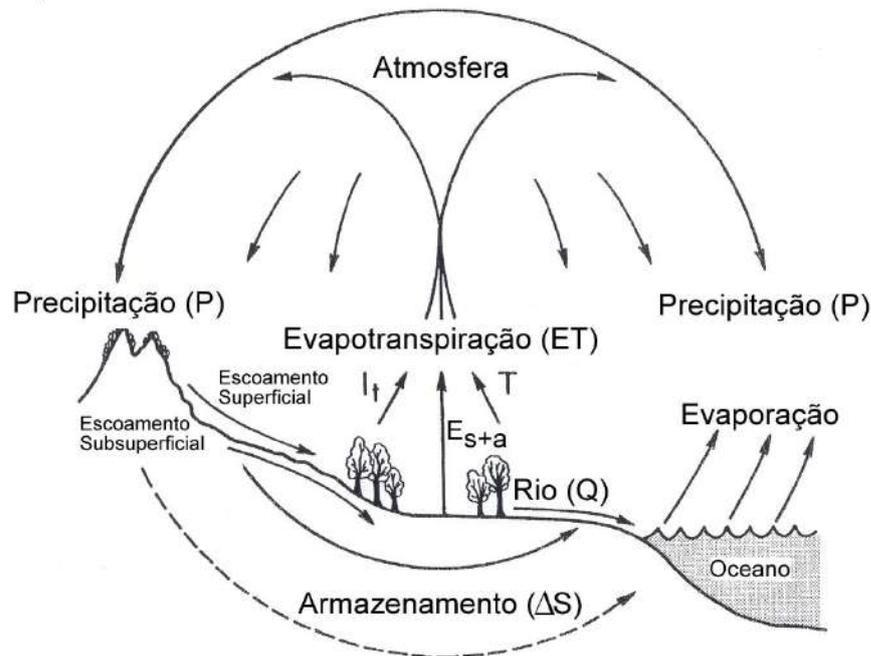


Figura 2 – O ciclo hidrológico.  $I_t$  = interceptação,  $E_s+a$  = evaporação do solo e corpos d'água,  $T$  = transpiração. Modificado de Hewlett (1982).

### 3.2 HIDROLOGIA DE BACIAS DE DRENAGEM

Bacia de drenagem é um conceito que pode ser definido como uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e solúveis para uma saída comum (COELHO NETTO, 2003). Ela forma um sistema, uma vez que apresenta elementos que possuem interrelações, classificado como aberto, em virtude de realizar trocas de materiais e energia com sistemas vizinhos. Além disso, as bacias de drenagem podem ser classificadas segundo a hierarquia fluvial da rede de drenagem. Os métodos de Horton (1945) e Strahler (1952) são alguns dos métodos de hierarquização mais utilizados em estudos fluviais e geomorfológicos. A menor hierarquia corresponde a ordem zero, relacionadas a bacias de drenagem não canalizadas. Segundo Tsukamoto (1973 *apud* TSUKAMOTO e MINEMATSU, 1987), as bacias de ordem zero são a unidade territorial mínima para que ocorra convergência de fluxo e se caracterizam como locais onde há a conexão entre os processos de vertente e os processos fluviais. À medida que os canais de uma bacia de drenagem se confluem a hierarquia desta bacia aumenta, sendo esta hierarquização dependente da densidade de drenagem da bacia e da escala de análise adotada.

Detalhamento das trajetórias que a água pode escoar por uma encosta, Dunne e Leopold (1978) definiram quatro diferentes mecanismos: o fluxo subterrâneo, o fluxo superficial Hortoniano, o fluxo subsuperficial de chuva e o fluxo superficial de saturação (Figura 3). De acordo com os autores, os caminhos tomados pela água determinam muitas das características da paisagem, a geração de fluxos de chuva nos canais, que tipos de uso de solo são mais apropriados e também as estratégias a serem tomadas para o manejo das áreas. A importância relativa de cada tipo de fluxo varia numa determinada região em função da geologia, clima, topografia, características do solo, vegetação e uso do solo. Da mesma forma, a importância do tipo de fluxo dominante também varia de acordo com as características das chuvas, sejam elas de maior ou menor intensidade (DUNNE e LEOPOLD, 1978).

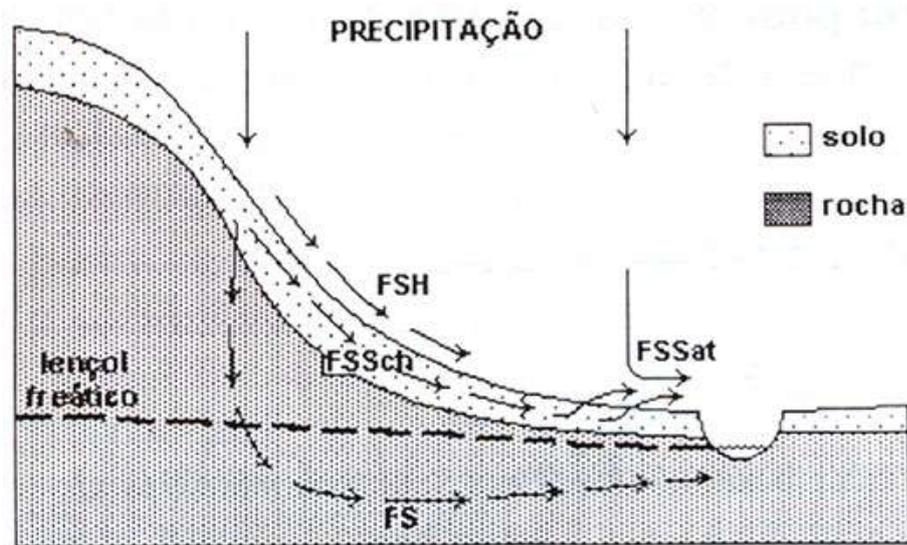


Figura 3 – Rotas de fluxos nas encostas. FSH = fluxo superficial Hortoniano, FS = fluxo subterrâneo, FSSch = fluxo subsuperficial de chuva e FSSat = fluxo superficial de saturação. Dunne e Leopold (1978) modificado por Coelho Netto (2003).

O estudo das vazões dos canais de drenagem determinou que os rios são abastecidos por um fluxo de água subterrânea que se faz presente até em momentos de estiagem. A esse fluxo foi dado o nome de fluxo de base (*base flow* ou *lowflow*), sendo também chamado de fluxo atrasado (*delayed flow*), sendo essa última denominação dada por Hewlett e Hibbert (1967). Esse fluxo subterrâneo provém da água subterrânea residente nos solos e nas rochas que pode ter ficado estocada por meses ou até milhares de anos, dependendo das características do aquífero. Ele possui uma velocidade muito inferior ao fluxo superficial Hortoniano, isso porque

percorre maiores distâncias no interior do solo, sendo retardado também pela dificuldade da água fluir por entre os grãos que compõem o solo.

Na análise de um hidrograma (relação de vazão de um canal de drenagem vs. tempo) também é possível observar o fluxo que é gerado logo após o início do evento de chuva e que, ao atingir os canais de drenagem, aumentam sua descarga e vazão: é o fluxo de chuva, denominado na literatura internacional como *stormflow*, *highflow* e *quickflow* (Figura 4). O fluxo de chuva é formado tanto a partir de fluxos superficiais (fluxo superficial Hortoniano e fluxo superficial de saturação) como subsuperficiais rasos (fluxo subsuperficial de chuva), os quais serão detalhados a seguir.

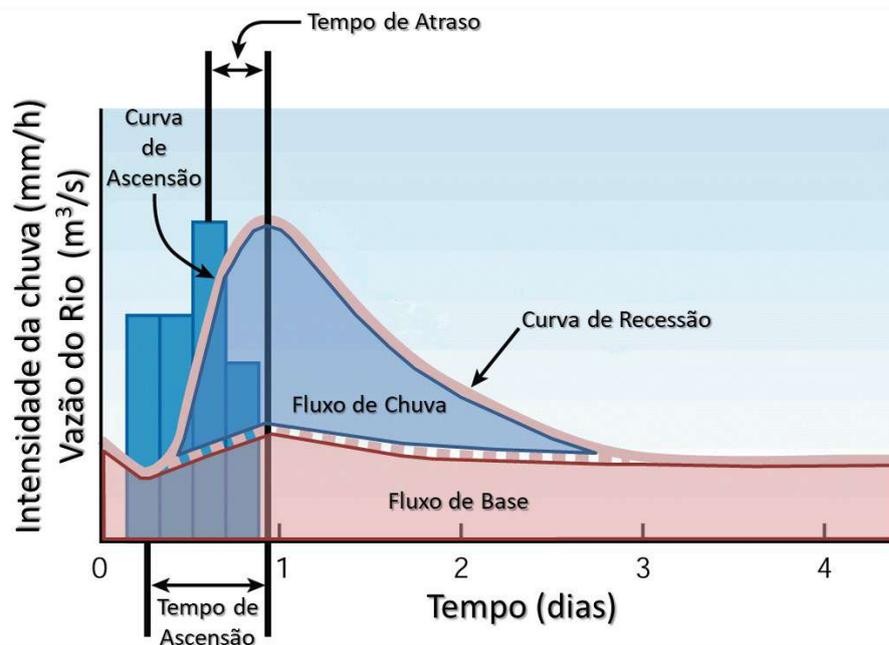


Figura 4 – Representação de um hidrograma em resposta à chuva numa bacia de drenagem. Modificado de FISRWG (1998).

O conceito de área de contribuição variável (HEWLETT e HIBERT, 1967) trouxe avanços no entendimento do comportamento hidrológico de bacias de drenagem, uma vez que destacou que nem o fluxo de chuva nem o fluxo de base são uniformemente produzidos no tempo e no espaço. Pelo contrário, o fluxo de água em um canal num determinado momento está sob a influência de uma área de contribuição dinâmica, que se expande e retrai ao longo do tempo, e que geralmente representa uma pequena porção da área total da bacia (Figura 5). Segundo Hewlett e Hibert (1967) o fluxo de chuva e a sua área de contribuição aumentam no início e se reduzem no final de um evento de chuva em função de dois processos que ocorrem simultaneamente

e são praticamente indissociáveis: o fluxo subsuperficial de chuva e a expansão e retração da rede de canais.

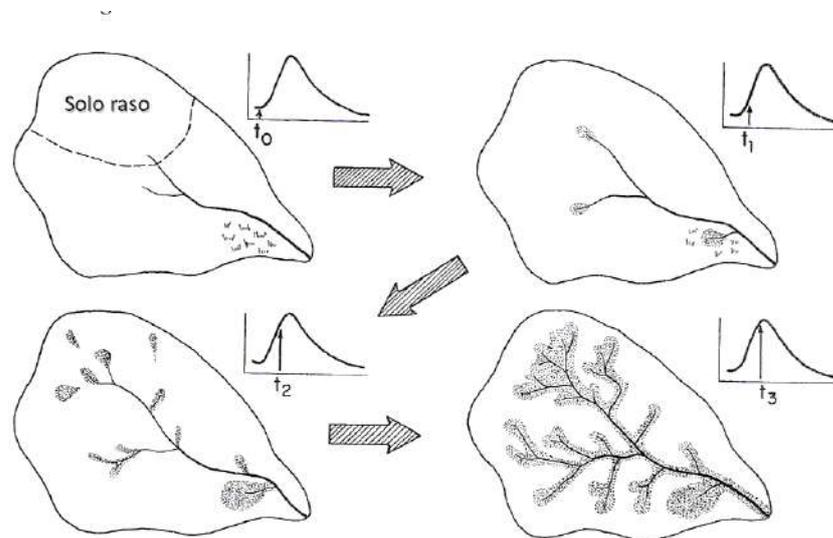


Figura 5 – Representação do conceito de área de contribuição variável. As pequenas setas nos hidrogramas indicam como a vazão aumenta à medida que ocorre o aumento da área de contribuição das áreas saturadas, solos rasos e canais temporários. Este processo se reverte quando ocorre a redução da vazão. Modificado de Hewlett (1982).

Segundo Coelho Netto (1994), Horton integrou o modelo de hidrologia superficial com o modelo de erosão pela ação desses fluxos, enfatizando o processo de formação de canais, rede de canais e vales ou bacias de drenagem em seus múltiplos níveis hierárquicos. Para o entendimento do fluxo superficial Hortoniano considera-se que o solo possui uma taxa máxima de absorção de água da chuva, a qual Horton (1933) chamou de “capacidade de infiltração”, sendo que essa taxa diminui logo após o início do evento chuvoso e tende a se estabilizar após algum tempo. Essa diminuição da capacidade de infiltração é explicada pela saturação gradual do perfil do solo como também pela selagem da superfície do solo gerada pelo efeito erosivo do impacto das gotas da chuva, denominado de erosão por “*splash*” ou salpicamento (GUERRA, 1994). Se em algum momento do evento chuvoso a intensidade da chuva for superior à capacidade de infiltração, o excedente de chuva passa a escoar superficialmente, dando origem ao chamado escoamento superficial Hortoniano, mas se a intensidade de chuva for igual ou inferior à capacidade de infiltração do solo não haverá escoamento e toda água infiltrará no solo (HORTON 1933, 1945). Esse fluxo é formado pela concentração de água em micro-depressões na superfície do terreno, possui alta velocidade e algumas vezes tem a capacidade

de erodir os solos, sendo que essa erosão pode evoluir verticalmente e, depois, lateralmente, dando origem a um canal erosivo e, em seguida, alargando suas paredes laterais (COELHO NETTO, 1994).

Quando um evento de chuva é iniciado, parte da água infiltra e percola o solo até atingir a zona saturada. Esse processo de recarga da zona saturada normalmente ocorre primeiro na base das encostas, uma vez que o nível freático nessa porção da encosta se encontra menos profundo do que na média e alta encosta (Figura 6). Com a subida do nível freático na base da encosta ocorre um aumento do gradiente hidráulico em direção ao canal, o que faz com que a velocidade dos fluxos subterrâneos aumente, de acordo com a Lei de Darcy. Esse fluxo extra de água subterrânea para os canais durante os eventos de chuva é chamado de fluxo subsuperficial de chuva. Em alguns casos, pode haver um horizonte com menor permeabilidade no perfil do solo, como uma camada de argila orgânica ou uma descontinuidade hidráulica em função do término da zona de raízes, o que acaba dificultando a percolação da água. Dessa forma, a água acumula sobre esse horizonte numa posição acima do nível freático e passa a fluir subsuperficialmente em direção à baixa encosta, somando-se ao fluxo subsuperficial de chuva. A esse fluxo que escoou subsuperficialmente sobre uma camada de menor permeabilidade dá-se o nome de fluxo subsuperficial raso de chuva.

O fluxo superficial de saturação possui dois componentes: o fluxo de retorno e também a precipitação direta sobre porção saturada. Esse tipo de fluxo ocorre nos fundos de vale após o nível freático atingir a superfície do solo, o que faz com que parte da água subterrânea aflore em superfície (fluxo de retorno) e se some à precipitação que incide diretamente sobre essa porção da encosta que já se encontra saturada (precipitação direta sobre porção saturada), gerando assim um outro tipo de fluxo superficial de mecanismo diferente do escoamento superficial Hortoniano. O fluxo superficial de saturação possui velocidade até cem vezes maior que os fluxos subsuperficiais de chuva e pode abastecer os canais gerando fluxos de chuva. Esses fluxos podem inclusive mudar os perfis dos hidrogramas com o aumento das vazões de pico e a redução do tempo de atraso entre o pico de precipitação e o pico de vazão.

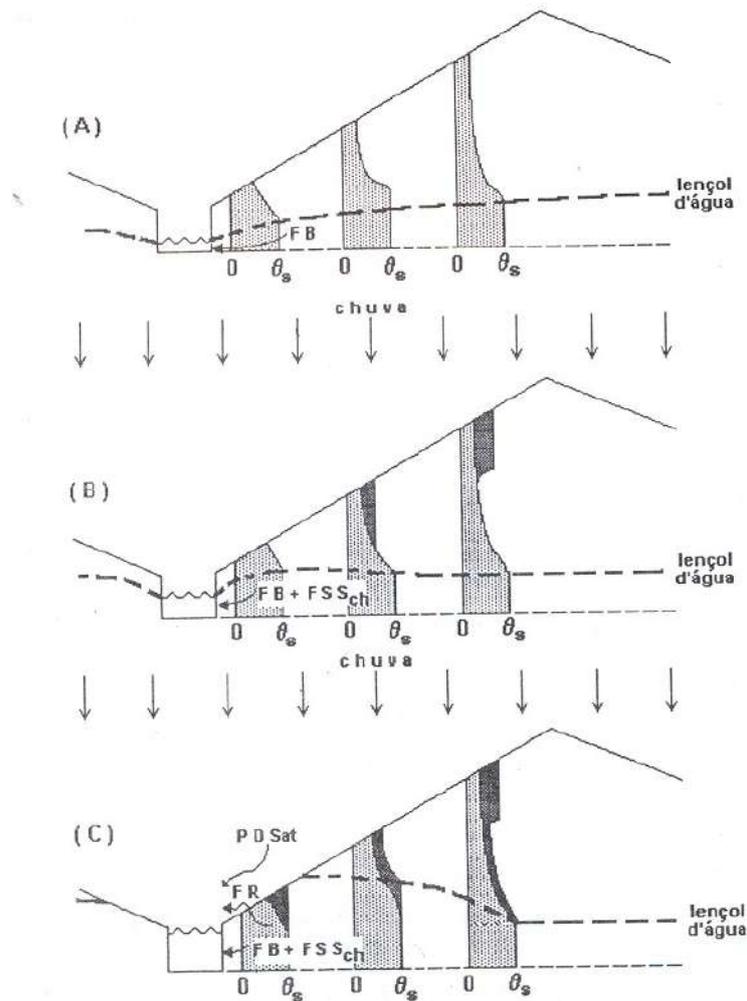


Figura 6 – Processo de infiltração numa encosta, e sua relação com o canal de drenagem. O diagrama mostra uma encosta com um canal na sua base, o lençol d'água e o gráfico de umidade do solo com a profundidade em três pontos. 0 é zero e  $\theta_s$  umidade saturada. (A) Condição antes da chuva; FB é o fluxo de base. (B) Resposta inicial à chuva, sendo o sombreamento escuro o adicional de umidade. O fluxo subsuperficial de chuva ( $FSS_{ch}$ ) é adicionado ao fluxo de base. (C) Na sequência da chuva o lençol sobe até a superfície na porção inferior da encosta e a zona saturada expande remontantemente. A água exfiltra como fluxo de retorno (FR), o qual, junto com a precipitação direta sobre a área saturada ( $PD_{sat}$ ), produz o fluxo superficial de saturação. Dunne e Leopold (1978) modificado por Coelho Netto (2003).

Sobre as cabeceiras de drenagem, sabe-se que elas se desenvolvem no domínio das encostas e apresentam topografia côncava sobre as quais originam ou avançam as cabeças dos canais (COELHO NETTO, 2003). Segundo essa mesma autora, o termo “cabeça do canal” refere-se às extremidades de montante dos canais erosivos que avançam progressivamente através dos fundos de vales de cabeceiras de drenagem e correspondem ao *channel head* de Dietrich e Dunne (1993) ou *stream head* (KIRKBY, 1994). Os canais erosivos das cabeceiras de drenagem drenam através da rede principal de canais fluviais, integrando os processos de encostas com

os processos fluviais. Assim a rede interconectada de canais fluviais constitui-se na principal via de descarga da bacia de drenagem e, por isso, tornou-se um dos principais objetos de grande interesse hidrológico e geomorfológico, especialmente a partir de Horton (1945). Ahnert (1998 *apud* COELHO NETTO, 2003) ressalta que a cabeceira de drenagem é um componente especial do sistema fluvial, porque é uma área onde a transição dos processos de denudação para transporte erosivo é caracterizada pela convergência em direção à porção terminal da rede de canais.

### 3.3 ÁGUA SUBTERRÂNEA

A água subterrânea é a forma mais abundante de água no estado líquido no ambiente terrestre, superando em cerca de trinta vezes a disponibilidade de água em rios e lagos (SHIKLOMANOV, 1998). Esta água encontra-se abaixo da superfície e encontra-se localizada em três zonas: a zona vadosa ou não saturada, a franja capilar e a zona saturada (Figura 7).

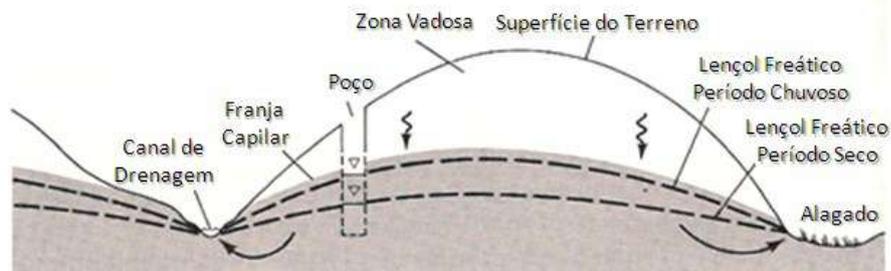


Figura 7 – Esquema de um aquífero não confinado (modificado de DUNNE e LEOPOLD, 1978).

A água contida na zona vadosa não preenche totalmente os vazios do solo, vazios estes representados pela porosidade do solo ou espaço entre fraturas das rochas. A água contida na zona vadosa pode percolar verticalmente e/ou lateralmente, além de também poder ficar estagnada em determinadas porções do solo por frações de tempo variáveis. A movimentação da água na zona vadosa depende de vários fatores, entre os quais podemos destacar o grau de saturação dos poros do solo, as propriedades físicas e químicas do solo, além da própria interação desta água com o sistema radicular das plantas, que, conjuntamente, determinam diferentes valores de condutividade hidráulica. A água pode ficar estocada temporariamente nesta zona quando as forças capilares produzidas pelos pequenos espaços entre as partículas

do solo se igualam ou superam a força gravitacional, isto sem considerar também a possibilidade de interações osmóticas entre a água e as partículas do solo (DUNNE e LEOPOLD, 1978). O termo utilizado para expressar a condição da água nesta situação é estado sob sucção ou poro-pressão negativa, o que, dependendo da intensidade, reduz drasticamente a percolação e retém a água aderida às partículas do solo.

A franja capilar é uma região localizada acima da zona saturada em que os vazios do solo também se encontram praticamente saturados (> 75% de saturação) em função da retenção da água por sucção (MANOEL FILHO, 2000). O comprimento da franja capilar depende basicamente da granulometria do solo. Solos argilosos possuem extensas franjas capilares, podendo chegar a mais de um metro de comprimento, enquanto nos solos arenosos este comprimento é geralmente desprezível.

A zona saturada é representada por uma região em que os espaços entre as partículas do solo e das fraturas das rochas estão completamente preenchidos por água. Seu limite superior corresponde ao lençol freático ou também denominado de superfície freática. No lençol freático a pressão é igual à atmosférica e abaixo de seu limite a pressão é superior à atmosférica. Quando uma determinada porção da zona saturada possui grande capacidade de armazenar água e esta água pode se deslocar com relativa facilidade, recebe o nome de aquífero. Já aquíclude é a denominação dos estratos do solo em que a água não consegue se deslocar, ou então este deslocamento é realizado em velocidades desprezíveis (MANOEL FILHO, 2000).

Em uma classificação simples, os aquíferos podem ser subdivididos em três grupos: aquíferos livres, aquíferos suspensos e aquíferos confinados (Figura 8). Nos aquíferos livres a superfície superior do aquífero (lençol freático) está submetida à pressão atmosférica. Os aquíferos suspensos também apresentam a superfície superior sob pressão atmosférica, mas o que os diferenciam é o fato deles serem, de modo geral, de expressão local e apresentarem um aquífero livre abaixo de sua posição. Já nos aquíferos confinados a pressão no nível superior dos mesmos é maior que a atmosférica. Em determinadas condições, ao serem perfurados, o nível da água que ascende pode sobrepor o lençol freático e também a superfície do terreno, caracterizando o artesianismo. O artesianismo só ocorre em aquíferos com algum grau de confinamento.

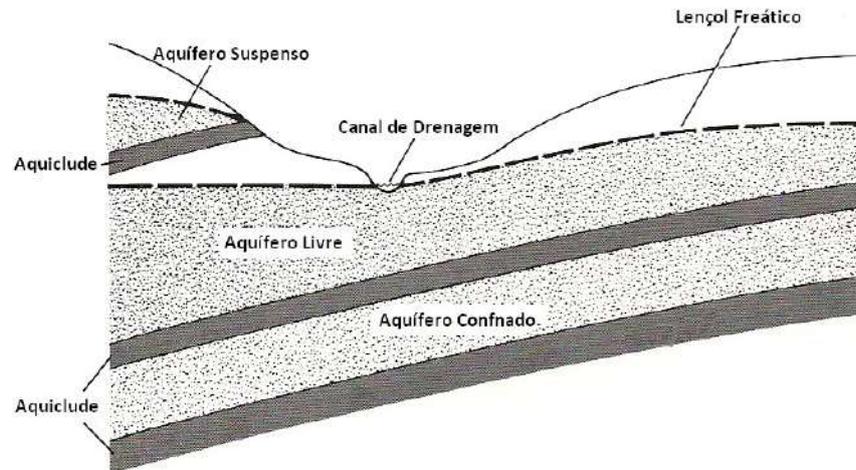


Figura 8 – Tipos de aquíferos em função da condição de confinamento e posição no perfil do solo (modificado de Dunne e Leopold, 1978).

A água contida na zona saturada pode estar distribuída pelos poros ou por estruturas da rocha, como as fraturas. A porosidade primária é observada em materiais inconsolidados e consolidados que tenham uma estrutura de organização das partículas que permitam a água ser armazenada e transferida através destas aberturas. Este tipo de porosidade (primária) é bastante comum em aluviões, depósitos eólicos e também em rochas sedimentares, como os arenitos. Rochas ígneas e metamórficas, embora apresentem reduzida porosidade primária, podem, em alguns casos, armazenar grandes quantidades de água e transmiti-la com certa facilidade. Isto se dá basicamente em função das fraturas (densidade, geometria, conectividade e preenchimento) existentes nestas rochas. Estudos demonstram que existe a tendência de uma maior condutividade hidráulica por estas fraturas em menores profundidades (MANOEL FILHO, 2000). Isto se deve a uma maior densidade e abertura dessas fraturas nestas condições, inclusive com uma maior eficiência no saprolito, conforme indicado na Figura 9 (MORTIMER *et al.*, 2011).

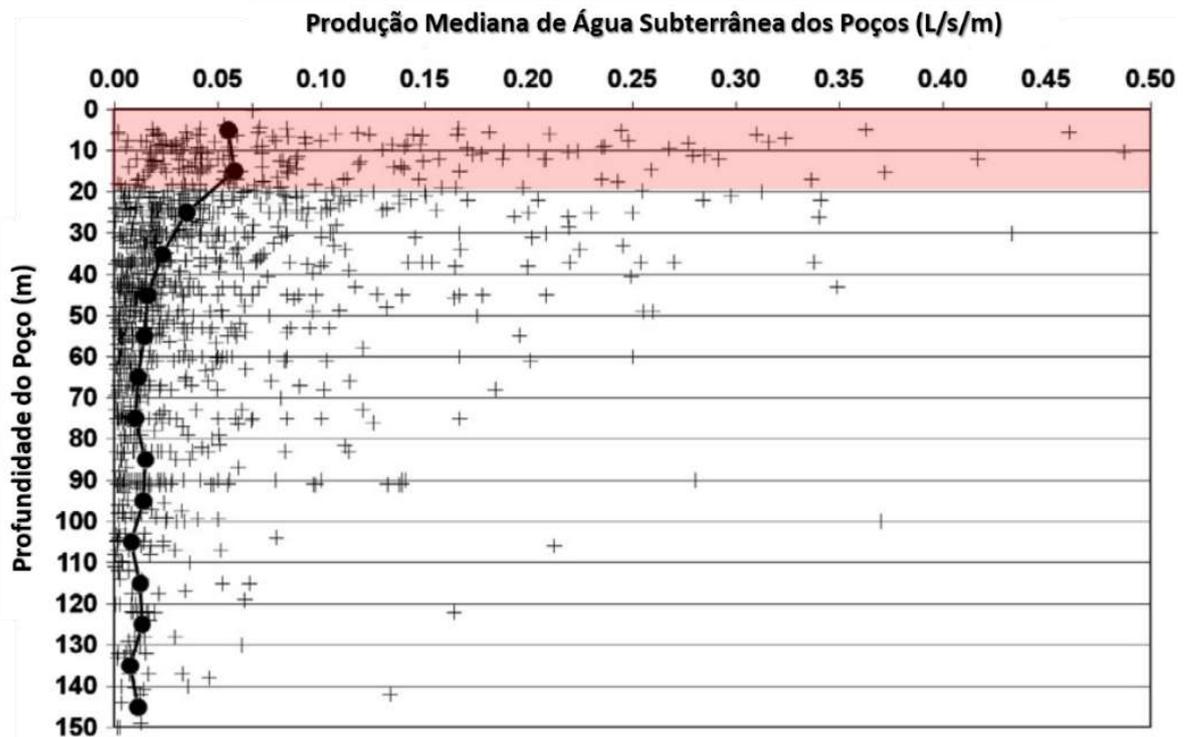


Figura 9 – Relação da produção de água dos poços em função da profundidade. Cada cruz representa um poço levantado e a linha a produção mediana. Os dados de produção foram normalizados pela profundidade dos poços. A área em vermelho indica a faixa de ocorrência de saprolitos (modificado de Mortimer *et al.*, 2011).

Os trabalhos de Tóth (1963, 1970, 1999) criaram um marco teórico e conceitual nos estudos da água subterrânea. Segundo este autor, a água subterrânea apresenta duas características que a torna um agente de enorme importância nos estudos ambientais, que são o fato da água interagir com o seu meio e o fato estar amplamente distribuída e fluindo em redes de drenagem hierarquicamente estruturadas (Figura 10). Estas interações e redes de fluxos ocorrem em todas as escalas espaciais e temporais, mas com velocidades e intensidades variáveis.

Segundo o modelo proposto por Tóth (1999), o fluxo da água subterrânea em escala regional é um dos responsáveis por criar e manter grande parte da heterogeneidade espacial dos processos e fenômenos observados na superfície, como locais ricos em determinados depósitos minerais, formação de regiões alagadas, padrões de vegetação, regiões com maior suscetibilidade à erosão por água subterrânea, etc. Em seu modelo proposto, áreas com pouca variação topográfica apresentam redes de fluxo simples (lado esquerdo da Figura 10), enquanto regiões com topografia variada (lado direito da Figura 10) apresentam redes de fluxo mais complexas (redes locais, intermediárias e regionais). Todas estas redes (locais,

intermediárias e regionais) possuem áreas de recarga, transferência e descarga. Nas áreas de recarga os potenciais hidráulicos são altos e decrescem com a profundidade, o que orienta os fluxos em sentido descendente e divergente. Em contraposição, nas regiões de descarga o potencial hidráulico é baixo e aumenta com a profundidade, o que torna os fluxos nestes locais ascendentes e convergentes. Nas zonas de transferência as linhas equipotenciais são praticamente verticais, o que indica que o fluxo nestas áreas é basicamente horizontal, sem tendência de ascensão ou aprofundamento dos fluxos. À medida que a água se desloca por estas redes de fluxo subterrâneo ela tem a sua composição físico-química alterada.

Desta forma, o modelo proposto por Tóth, que vem sendo amplamente discutido e utilizado, possui múltiplas aplicações na hidrologia, química, mineralogia, ecologia, geomecânica e geomorfologia.

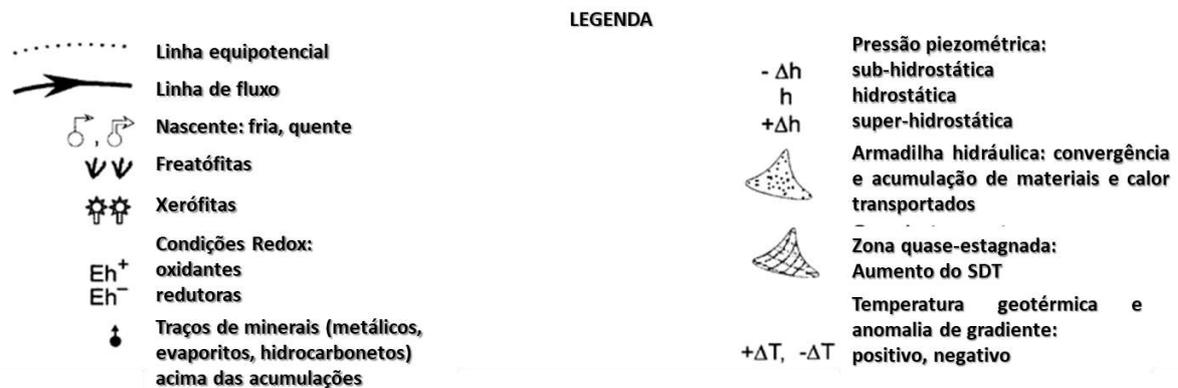
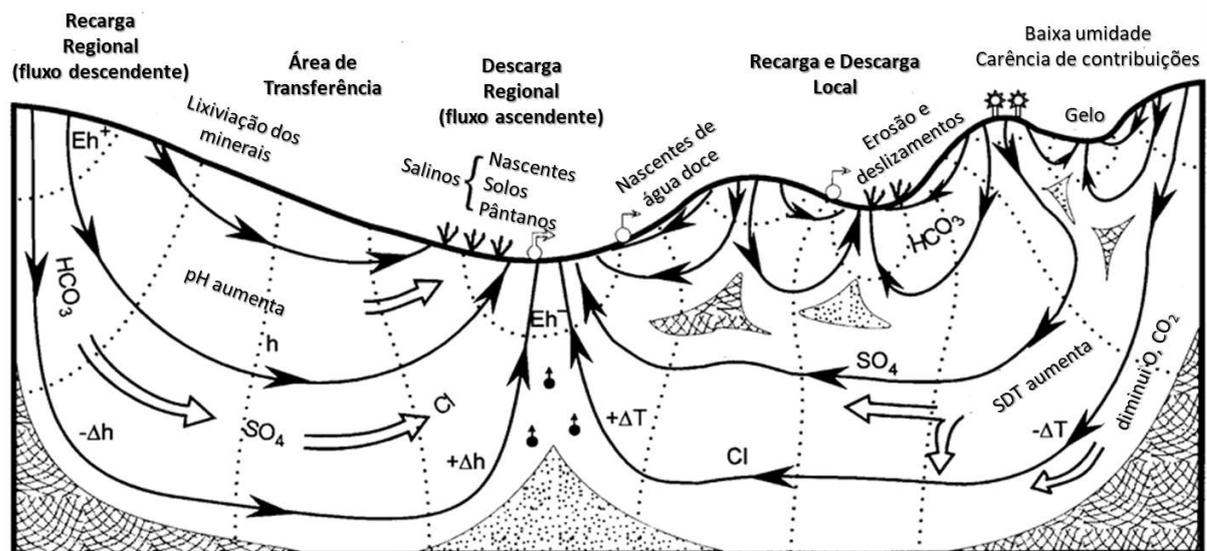


Figura 10 – Efeitos e manifestações do fluxo impulsionado pela gravidade em uma bacia de drenagem regional não-confinada (adaptado de Tóth, 1999).

### 3.4 VEGETAÇÃO NA REGULAÇÃO HIDROLÓGICA

Sobre os ambientes florestais, como, por exemplo, aqueles que preponderavam no médio vale do rio Paraíba do Sul antes do desmatamento no início do ciclo do café, vários autores (MUSGRAVE, 1947; HEWLETT e NUTTER, 1969; COELHO NETTO, 1985; CASTRO JÚNIOR, 1991) afirmam que a grande capacidade de armazenamento da água da chuva e as raras ocorrências de fluxo superficial podem ser atribuídas como características hidrológicas principais dos ecossistemas florestais devido: a) à minimização do impacto das chuvas pela cobertura vegetal no processo de interceptação, tanto pelo dossel como pela camada de serrapilheira; b) à estruturação da camada de serrapilheira, que evita a obstrução dos canais não-capilares pela ação do impacto das gotas; c) ao número elevado de bioporos presentes nos horizontes superficiais como resultado da intensa atividade biológica da fauna e da profusão de raízes.

Nem toda a precipitação que cai sobre uma área florestada alcança o solo, suprimindo dessa forma as necessidades da vegetação e também podendo gerar algum tipo de escoamento. Parte é absorvida pelo dossel e pela serrapilheira sendo evaporada de volta para a atmosfera. Essa parcela de água resultante da diferença do total precipitado e a precipitação que efetivamente chega ao solo (precipitação terminal) é conhecida como interceptação (DUNNE e LEOPOLD, 1978), conforme demonstrado na Figura 11. O processo de interceptação das chuvas é considerado o efeito hidrológico mais efetivo da floresta no que diz respeito à precipitação (LIMA, 1996).

A água pode percorrer o seu percurso até chegar ao topo do solo por dois caminhos: como fluxo de atravessamento (*throughfall*) ou fluxo de tronco (*stemflow*). O fluxo de atravessamento corresponde à água que consegue atravessar diretamente o dossel ou que faz esse caminho a partir do gotejamento das folhas e galhos. Já o fluxo de tronco corresponde à parcela da água que escoia pelos troncos (HEWLETT, 1982; DUNNE e LEOPOLD, 1978; COELHO NETTO, 1994).

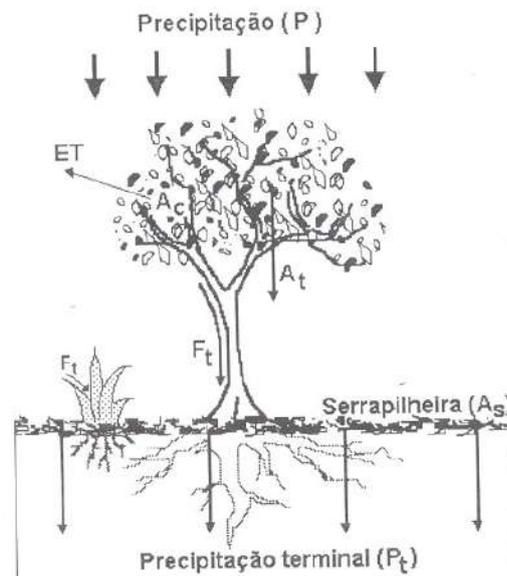


Figura 11 – Interação entre a precipitação e a vegetação. P: precipitação, ET: evapotranspiração,  $A_c$ : armazenamento nas copas,  $A_t$ : atravessamento e  $F_t$ : fluxo de tronco (extraído de Coelho Netto, 2003).

Uma pequena parcela do total precipitado chega diretamente ao solo em áreas com vegetação densa. Parte da água da precipitação é armazenada nas folhas, galhos, caules e troncos da vegetação. Quando essas superfícies já se encontram úmidas a água passa a escoar para os estratos inferiores da vegetação e então para a camada de serrapilheira, onde uma outra parcela de água é interceptada, antes de atingir o solo mineral. A quantidade de água que é armazenada nessas diversas superfícies vegetais é conhecida como armazenamento de interceptação (*interception storage*), e sua magnitude depende de diversos fatores, como forma, densidade e textura das folhas, galhos, entre outras superfícies (DUNNE e LEOPOLD, 1978), assim como de características das chuvas, como número e espaçamento entre os eventos e a intensidade da precipitação (HEWLETT, 1982).

A água que passa pelo dossel como fluxo de atravessamento tende a adquirir uma energia cinética maior abaixo das copas, energia essa que é desenvolvida durante a queda livre das gotas, resultando em maior poder erosivo à medida que o diâmetro das gotas aumenta (LEE, 1980 *apud* MONTEZUMA, 2005). Vis (1986 *apud* MONTEZUMA, 2005), analisando esse comportamento em florestas tropicais colombianas, verifica que a erosão por salpico é de 15 – 44% maior nos ambientes florestais quando comparados aos campos abertos. Na continuação, esse mesmo autor ressalta a importância da integridade do sub-bosque para a proteção do solo, uma vez que esse estrato reduz a altura e a energia da queda das gotas de chuva.

Nesse mesmo sentido, Herwitz (1987), utilizando simuladores de chuva, demonstra que as gotas provindas do atravessamento podem ter diâmetro de até 1,8 vezes maior que o tamanho das gotas da precipitação sobre o dossel.

Estudos realizados no domínio da floresta ombrófila densa no município do Rio de Janeiro demonstram a existência de uma grande variabilidade temporal na interceptação mensal, relacionando essa variabilidade com variações na distribuição das chuvas, principalmente com a intensidade dos eventos (COELHO NETTO *et al.*, 1986; MIRANDA, 1992). Esses estudos demonstram que existe uma maior interceptação na estação mais seca (maio a agosto) devido à menor intensidade da chuva nesse período e à elevada demanda hídrica pela vegetação. Miranda (1992) demonstra que eventos com precipitação total inferior a 10 mm podem ser totalmente interceptadas pelo dossel da floresta ombrófila do Maciço da Tijuca no Rio de Janeiro. Herwitz (1985 *apud* LIMA, 1996), estudando a capacidade de saturação da copa de cinco espécies tropicais, obteve valores que variam de 2,2 a 8,3 mm, enquanto outros estudos com espécies do gênero *Eucalyptus* obtiveram valores que variam de 0,2 a 2,0 mm (LIMA, 1996).

Oliveira e Coelho Netto (2001), ao avaliar a interceptação da chuva pelas copas arbóreas em áreas florestadas em diferentes estágios sucessionais, apontam médias de 27,7% em vegetação pioneira, 28,9% em vegetação secundária e de 58,6% em floresta clímax. Os estudos realizados por Miranda (1992) indicam valores de interceptação de 24,5%, enquanto Coelho Netto (1985) de 11%, ambos estudos realizados na bacia do alto rio Cachoeira, município do Rio de Janeiro. Em florestas naturais e plantios de eucalipto em diferentes condições ambientais e idades os valores de interceptação variam de 5,3 a 24,0% (LIMA, 1996).

Referente à variabilidade espacial do fluxo de atravessamento, apesar de muitos estudos avaliarem o atravessamento em áreas de *Eucalyptus*, existe a carência de estudos que enfoquem a variação espacial do atravessamento nestes plantios, apesar de ser reconhecido que tanto a quantidade como a qualidade do atravessamento são variáveis espacialmente e temporalmente (KIMMINS, 1973). A escassez de trabalhos focando a variabilidade espacial do atravessamento em plantios de eucaliptos contrasta com os estudos realizados em outros plantios e biomas, como os realizados em florestas e plantações de coníferas (FORD e DEANS, 1978; WHELAN *et al.*, 1998, RAAT *et al.*, 2002; SHACHNOVICH *et al.*, 2008), plantios variados (PARK e CAMERON, 2008), florestas tropicais (COELHO NETTO, 1985;

HOLWERDA *et al.*, 2006; LOESCHER *et al.*, 2002, ZIMMERMANN *et al.*, 2007) e outros biomas (LAWRENCE e FERNANDEZ, 1993; CARLYLE-MOSES *et al.*, 2004; KEIM *et al.*, 2005; STAELENS *et al.*, 2006). Um trabalho sobre este tema em plantios de eucalipto foi realizado por Sato *et al.* (2011), sendo demonstrado que os fluxos de atravessamento são extremamente variáveis espacialmente, com valores superiores à precipitação em alguns pontos próximos aos troncos. A arquitetura do dossel proporciona um “efeito funil”, captando a precipitação que cai sobre as copas em pontos mais distantes do tronco e concentrando-os nas proximidades do tronco (Figura 12).

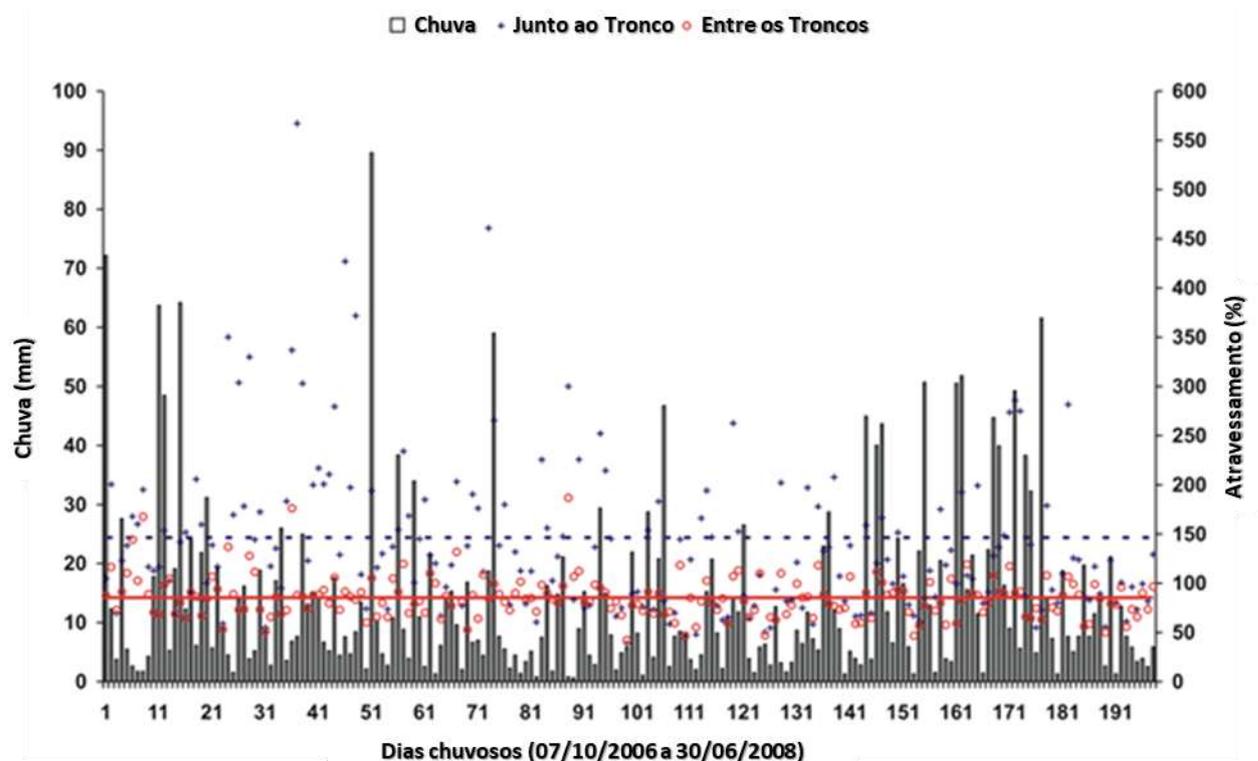


Figura 12 - Relação da precipitação diária (mm) e o atravessamento (%) junto aos troncos (cruzes azuis) e entre os troncos (círculos vermelhos) do eucalipto (extraído de Sato *et al.*, 2011).

A entrada concentrada do atravessamento próximo aos troncos juntamente com o maior adensamento das raízes na base dos troncos (BOUILLET *et al.*, 2002; O'GRADY *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2009) facilita a infiltração da água no solo, uma vez que as raízes atuam como vias preferenciais de percolação de água no solo (SILVEIRA *et al.*, 2005). As raízes também são as portas de entrada de água dos vegetais e esta concentração do atravessamento da chuva próximo aos troncos poderia aumentar a disponibilidade de água para os eucaliptos. El-Lakany e Mohamed

(1993) observaram que indivíduos de *Eucalyptus camaldulensis* desenvolveram seu sistema radicular direcionado para pontos onde ocorria maior concentração de água por irrigação, sendo este adensamento de raízes promovido tanto pelas raízes laterais como também das raízes verticais, que sofreram mudanças acentuadas de direção para aumentar a absorção de água.

Sabe-se que a variabilidade do atravessamento pode estar relacionada com o crescimento das raízes, aumentando a densidade de raízes nos locais onde ocorrem os maiores valores de atravessamento (FORD e DEANS, 1978), e que as concentrações de nutrientes nesses fluxos de atravessamento são inversamente proporcionais ao volume total devido à diluição (ZIMMERMANN *et al.*, 2007; RAAT *et al.*, 2002; WHELAN *et al.*, 1998; CROCKFORD *et al.*, 1996). Além disso, muitos autores relacionam os volumes de atravessamento com estrutura do dossel (abertura e arquitetura) e a distância em relação ao tronco das árvores, porém estas relações se mostram muitas vezes opostas de um estudo para o outro em virtude das características específicas da estrutura do dossel de cada espécie avaliada. Schaap *et al.* (1997) também relacionam o aumento abrupto da umidade no solo em determinados pontos com a dinâmica do atravessamento e drenagem, demonstrando que a umidade no solo também apresenta variabilidade espacial e padrões temporais característicos. Entretanto, Shachnovich *et al.* (2008) não encontraram uma relação direta entre a maior concentração dos fluxos de atravessamento em alguns pontos e a umidade no solo destes pontos, sendo estes resultados relacionados com a movimentação horizontal da água na matriz do solo.

Estudos de Vallejo e Vallejo (1981), Miranda (1992) e Negreiros (2004) demonstram uma grande variação pontual do atravessamento de chuvas individuais pelas copas arbóreas na Floresta da Tijuca (RJ). Em alguns casos foram encontrados valores de fluxo de atravessamento superiores aos valores de precipitação acima das copas arbóreas, demonstrando que existe convergência de fluxos em alguns pontos. Segundo os autores citados, tais ocorrências estão relacionadas com a umidade antecedente, composição e estrutura da vegetação, como, por exemplo, alguns aspectos fisionômicos da vegetação atuando como agentes que concentram pontualmente as chuvas no interior da floresta. Um exemplo são os galhos das árvores de grande porte que se projetam em ângulos semi-horizontais e que concentram os fluxos de atravessamento (HERWITZ, 1987) e outro exemplo são as bromélias que captam água através de suas folhas e a acumulam no interior do copo de

armazenamento basal que ao transbordar gera um fluxo de atravessamento pontual e concentrado. Herwitz (*op cit.*), descrevendo a distribuição espacial dos fluxos de atravessamento, observa que os fluxos em torno do perímetro dos indivíduos florestais são mais constantes e contribuem para os valores mínimos, enquanto os fluxos próximos ao tronco são mais variáveis e responsáveis pelos maiores valores devido aos galhos primários (galhos formados a partir de ramificações do tronco).

No que diz respeito ao fluxo de tronco, Montezuma (2005) cita que, de modo geral, o fluxo de tronco não ultrapassa 5% da precipitação total, mesmo em florestas tropicais úmidas. O estudo de Miranda (1992) deixa bastante claro que existem grandes discordâncias no que tange a metodologia para determinação da área de contribuição para o fluxo de tronco, o que acaba, muitas vezes, tornando os resultados bastante diferentes e de difícil comparação. No seu estudo, é descrito um fluxo de tronco médio de 1,8% do total precipitado, mostrando-se um mecanismo de pequena magnitude. O mesmo ocorre no estudo de Laclau *et al.* (2003) e Valente *et al.* (1997) em plantios de eucalipto, com valores respectivos de 1,66% e 1,73%.

Com a chegada da água ao piso florestal através do fluxo de atravessamento e do fluxo de tronco, parte dessa água é absorvida pela camada de serrapilheira, que, além de atuar como agente facilitador da infiltração, impede o gotejamento direto das gotas de chuva na superfície mineral. Estudos conduzidos por Vallejo (1982), Coelho Netto (1985, 1987) e Castro Júnior (1991), confirmam o papel exercido pela serrapilheira na diminuição da erosão superficial, evitando a selagem do topo do solo e permitindo altas taxas de infiltração no ambiente florestal.

Na interface serrapilheira – topo do solo nos ambientes de floresta Atlântica ocorre tanto o processo de infiltração como o de escoamento superficial intra-serrapilheira no horizonte  $O_2$  (COELHO NETTO, 1987) sendo que essa água infiltra de forma lenta e gradual na matriz do solo. Essa autora detalha a função da camada de serrapilheira no ciclo hidrológico evidenciando que os fluxos que atingem a serrapilheira são redistribuídos no interior da camada  $O_1$  e direcionados para a camada  $O_2$ , onde, após serem concentrados, são canalizados para a camada de raízes finas subjacente. Nesse mesmo estudo a autora descreve o desenvolvimento de uma camada de fungos com características hidrofóbicas sobre a serrapilheira durante os meses mais secos, o que forma fluxos superficiais nessas condições. Outros autores (MARTINEZ-MURILLO e RUIZ-SINOVA, 2007), estudando áreas ao sul da Espanha sob clima Mediterrâneo, também descrevem uma grande

hidrofobicidade no período seco, mas dessa vez não da camada de serrapilheira e sim do solo. Resultados apontados por Lima (1990), Zhou *et al.* (2002) e Sato (2008) também indicam a importância do controle hidrológico proporcionado pela camada de serrapilheira, que reduz o escoamento superficial e aumenta a infiltração da água no solo. Os resultados apontados por Melos *et al.* (2011) indicam que o escoamento superficial médio observado em parcelas de escoamento no divisor de drenagem (declividade de 8°) e na encosta lateral (declividade de 24°) foram, respectivamente, de 0,2% e 0,7% na razão escoamento/precipitação, o que indica a quase inexistência de escoamento superficial no interior dos plantios de eucalipto.

Coelho Netto (1985) observou valores de capacidade de retenção hídrica (CRH) de 162% no horizonte O<sub>1</sub> (serrapilheira em início de decomposição) e 201% no O<sub>2</sub> (serrapilheira em avançado estágio de decomposição), enquanto os estudos de Vallejo (1982) demonstram valores de 134 – 320% do seu peso seco na camada O<sub>1</sub> e de 268–335% na camada O<sub>2</sub>, ambos estudos realizados no domínio da floresta Atlântica no maciço da Tijuca (RJ). No estudo de Deus (1991), em áreas com gramíneas para pastagem no MVRPS, são apontados valores de CRH pelas gramíneas do gênero *Paspalum* de até 500% durante o período de estiagem. Os estudos conduzidos na bacia do rio Sesmaria também detectaram uma elevada produção anual de serrapilheira (4,4 Mg.ha<sup>-1</sup>) associada a um baixo coeficiente de decomposição (K = 0,39), proporcionam o acúmulo de serrapilheira no piso florestal, que atingiu valor médio de 11,9 Mg.ha<sup>-1</sup> em um plantio com quatro anos de idade (MELOS *et al.*, 2011). Esta serrapilheira apresenta capacidade de retenção hídrica (CRH = 235%) e papel de regulador hidrológico similar à serrapilheira da floresta Atlântica.

Entretanto, sabe-se que a serrapilheira não desempenha o papel de retentor hídrico apenas nos momentos das precipitações. Miranda (1992) descreve que além da camada de serrapilheira reter parte da água que chega ao piso florestal, ela perde essa água retida de forma gradual, sendo de forma acelerada nos primeiros dias de estiagem e de forma mais lenta após três dias sem chuva, o que acaba mantendo uma alguma umidade no topo do solo. Essa retenção de umidade diferenciada no tempo tem como consequência uma liberação gradativa da água para o sistema florestal, o que favorece tanto as sementes e plântulas que se desenvolvem no sub-bosque, como também a atividade da fauna endopodônica.

A redução do tempo de decomposição da serrapilheira reflete-se sob a forma de uma menor altura das camadas da serrapilheira, o que poderia indicar uma menor capacidade de armazenamento de água (MONTEZUMA, 2005), mas sabe-se que a serrapilheira mais decomposta possui uma maior capacidade de retenção de água, conforme citado anteriormente. Contudo, a decomposição acelerada significa uma incorporação de material orgânico ao solo de forma mais rápida, favorecendo a atividade da fauna do solo.

No compartimento do topo do solo também é importante o papel da atividade biológica no controle hidrológico, com destaque para a fauna endopedônica. Os solos apresentam uma fauna bastante variada que está disposta, na sua maior parte, nas porções superiores do solo (0 - 5 cm de profundidade) e na camada de serrapilheira, onde o oxigênio, as condições de alimentação e a estrutura do solo lhes são favoráveis (CASTRO JÚNIOR, 1991). Como consequência direta dessa atividade biológica, o número de macroporos é maior nos primeiros cinco centímetros do que nos horizontes inferiores, o que aumenta a permeabilidade do solo na sua porção superior (CASTRO JÚNIOR, *op. cit.*). Este estudo aponta uma grande densidade de indivíduos no topo do solo, sendo os valores médios de 20.058 indivíduos.m<sup>-2</sup> no estrato de 0 – 5 cm de profundidade e de 3.770 indivíduos.m<sup>-2</sup> de 15 – 20 cm. No estudo feito por Louzada *et al.* (1997) é demonstrado que a densidade de ácaros é 44 vezes maior na comparação da serrapilheira de uma floresta secundária semi-decídua com um plantio de eucalipto, enquanto no levantamento de colêmbolas essa diferença é de 33 vezes. Schoereder *et al.* (1990 *apud* LOUZADA *et al.*, 1997) afirma que os sistemas agroflorestais homogêneos podem produzir efeitos negativos no processo de decomposição quando comparados aos ambientes de vegetação nativa, sendo um dos motivos a existência de uma baixa abundância e diversidade de fauna no solo desses agrossistemas.

Na matriz do solo são encontradas raízes de diversos tamanhos, comprimentos e orientações que atuam não só como estruturas de absorção e fixação das espécies vegetais, mas como também estruturas que orientam a movimentação da água no solo. Sabe-se que o desenvolvimento do sistema radicular é controlado tanto por fatores relacionados com as propriedades do solo (umidade, composição, porosidade), como também pelas propriedades intrínsecas das espécies vegetais (ARMSON, 1977; RAVEN *et al.*, 2001). No que tange a função hidrológica do sistema radicular, Greenway (1987 *apud* MONTEZUMA, 2005) cita que: I) as raízes aumentam a resistência do solo superficial e a capacidade de infiltração do solo; II) extraem a

umidade do solo, reduzindo a poro-pressão do solo; e III) a depleção da umidade do solo pode acentuar a dissecação do solo formando rachaduras que aumentam a capacidade de infiltração.

Essa ambivalência também foi tratada por outros autores, como De Ploey e Cruz (1979 *apud* MONTEZUMA, 2005), que consideram que as raízes aceleram a infiltração, reduzindo a saturação nas porções superiores do solo, saturando de água as camadas mais profundas, o que pode desencadear movimentos de massa nos eventos de chuva mais intensos. Nesse sentido, o estudo de Deus (1991) descreve a formação de descontinuidades hidrológicas na zona de maior concentração de raízes. Estudos realizados pela equipe do Laboratório GEOHECO/UFRJ nas encostas florestadas do maciço da Tijuca/RJ indicam que as raízes das espécies arbóreas desempenham um papel relevante como vias preferenciais dos fluxos de percolação de água no solo (FREIRE ALLEMÃO, 1997; JANSEN, 2001; SILVEIRA, 2004; SILVEIRA *et al.*, 2005). Esta última autora demonstra experimentalmente a formação de uma camada de solo temporariamente saturada logo abaixo da zona de enraizamento, comprovando uma maior percolação da água no solo até o nível das raízes e uma redução da condutividade abaixo do mesmo.

### 3.5 O CONSUMO<sup>1</sup> DE ÁGUA PELA VEGETAÇÃO

A vegetação interfere no balanço hidrológico de bacias de drenagem de diversas maneiras e a magnitude dessa interferência depende de fatores biológicos, climáticos, geomorfológicos e de manejo (em plantios), sendo também imprescindíveis nesta associação as dimensões espaciais (composição e estrutura de paisagens) e temporais. Segundo Le Maitre *et al.* (1999), a vegetação pode consumir água de duas maneiras: 1º) absorvendo a água diretamente da zona saturada do solo<sup>2</sup>; ou 2º) reduzindo a recarga dos aquíferos. A redução da recarga dos aquíferos

---

<sup>1</sup> O termo “consumo” foi utilizado em consonância com a expressão *water consumption* da literatura internacional. “Consumo” aqui descrito refere-se não só ao uso, mas à própria dissipação da água, conforme significado apontado pelo dicionário Priberam ([www.priberam.com](http://www.priberam.com)). Sendo assim, a interceptação das chuvas e a transpiração, embora sejam processos que não incorporem a água à biomassa do vegetal, são considerados como processos de consumo de água, uma vez que retiram água das bacias de drenagem.

<sup>2</sup> As plantas que absorvem a água diretamente da zona saturada do solo recebem o nome de freatófitas.

se dá pelo processo de interceptação e também pela absorção da água na zona vadosa do perfil do solo.

Os estudos conduzidos para avaliar este papel da vegetação como consumidora de água tiveram dois marcos importantes ao longo do tempo: estudos conduzidos em bacias hidrográficas através do cálculo do balanço hídrico e estudos em bacias de drenagem pareadas. Estes métodos se diferenciam daqueles que têm base física e teórica, mas requerem vários parâmetros que não estão sempre disponíveis para uso, como o método de Penman-Monteith.

O cálculo do balanço hídrico anual de bacias através da estimativa da evapotranspiração pela diferença da precipitação e a vazão, assumindo que a variação do armazenamento é negligenciável, foi a primeira forma de avaliar as alterações temporais nas respostas hidrológicas das bacias de drenagem. Entretanto, este método apresenta restrições, uma vez que não existem controles climáticos, isto é, não existem formas de avaliar se uma alteração na evapotranspiração de uma bacia de drenagem está relacionada com alterações das entradas, como variações na precipitação ou entrada de energia nestes sistemas. Desta forma, o método de avaliação do balanço hídrico de uma única bacia não apresenta respostas satisfatórias na determinação dos efeitos dos diferentes usos do solo e cobertura vegetal nos valores de evapotranspiração (HEWLETT, 1982).

Um método alternativo ao de avaliação de uma única bacia foi primeiramente utilizado nos estudos hidrológicos em bacias florestadas no Colorado/EUA no início do século XX e publicado por Bates e Henry (1928). O método empregado avaliava o comportamento de duas bacias pareadas, sendo desenvolvido exatamente para suprir as limitações do método que avaliava o balanço hídrico numa única bacia. Por este método duas bacias vizinhas ou próximas são selecionadas para o monitoramento de suas vazões baseado na premissa de que elas possuem similaridades no tamanho, tipo de cobertura vegetal, aspecto e estejam submetidas às mesmas condições climáticas (Figura 13). Este método se baseia na elevada correlação que geralmente é observada entre a vazão anual das duas bacias monitoradas durante o período de calibração, sendo que a partir desta correlação é obtida uma equação de predição da vazão da bacia tratada a partir da vazão da bacia que não sofreu alterações (controle). De acordo com Andréassian (2004), o método de bacias pareadas apresenta duas vantagens em relação ao monitoramento isolado de bacias: ele elimina problemas relacionados com a variabilidade climática e com a variabilidade inter-bacias. Sendo

assim, os resultados obtidos ao longo do tempo em uma única bacia são difíceis de interpretar devido às variações climáticas ao longo do tempo e os experimentos que monitoram duas bacias com coberturas distintas apresentam dificuldades de comparação em virtude da imprevisibilidade do comportamento hidrológico entre as diferentes coberturas. Como neste tipo de experimento estas condições são controladas, diferentemente do método de monitoramento de uma única bacia, pode-se assumir que as variações encontradas nos valores de vazão esperados e observados se relacionam com mudanças na evapotranspiração da bacia tratada.

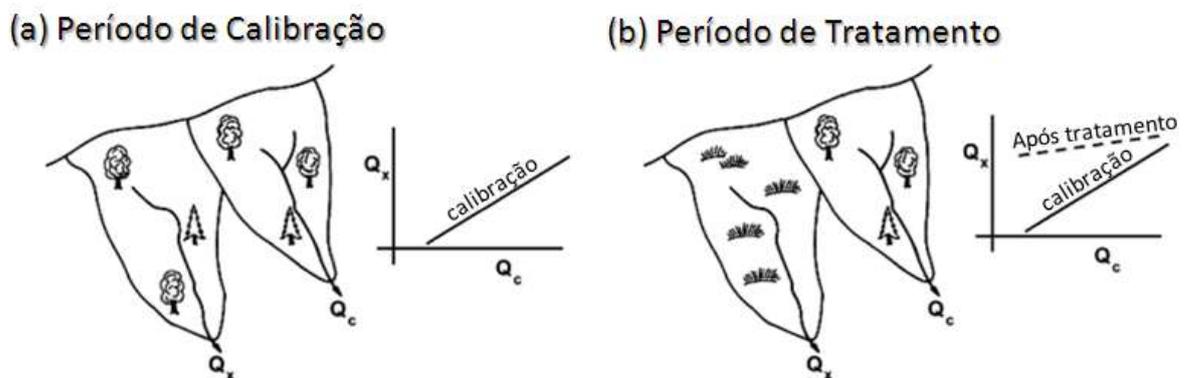


Figura 13 – Esquema do experimento com bacias pareadas (modificado de Hewlett, 1982).

Na literatura existe uma série de revisões dos resultados obtidos por experimentos com bacias pareadas (HIBBERT, 1965; BOSH e HEWLETT, 1982; ANDREÁSSIAN, 2004 e BROWN *et al.* 2005). De modo geral eles indicam que o desmatamento de bacias tende a gerar aumentos nas vazões e o reflorestamento a redução das vazões (Figura 14), muito embora o tempo necessário para alcançar um novo estado de equilíbrio seja mais curto para os experimentos de desmatamento do que para os de reflorestamento. Na revisão realizada por Brown *et al.* (2005) também são relatadas dificuldades encontradas por outros autores para utilizar dados anuais na calibração das equações, isto porque geralmente existem dificuldades para obter calibrações de longa duração. Outros autores, como Lane e Mackay (2001), Scott e Lesch (1997) e Watson *et al.* (2001) utilizaram dados mensais na elaboração das curvas de calibração das bacias pareadas.

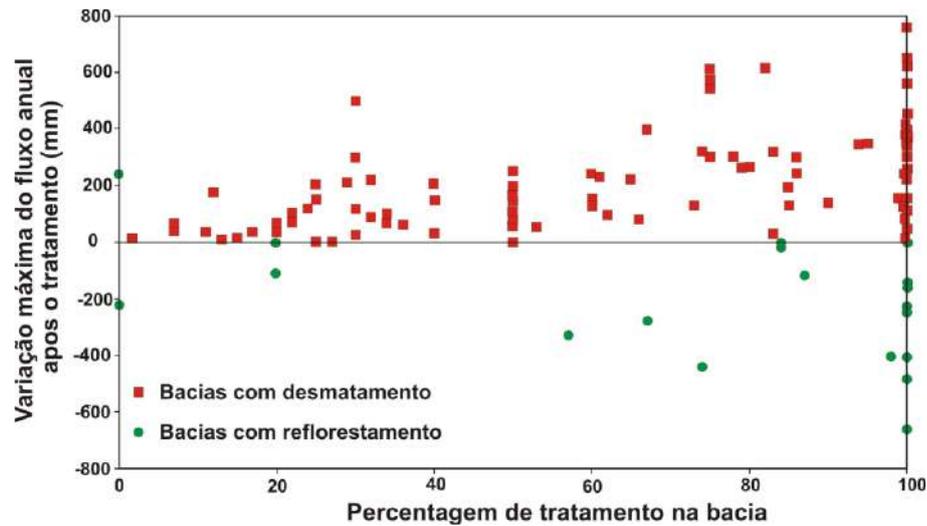


Figura 14 – Variação máxima no deflúvio após o tratamento de desmatamento ou reflorestamento de uma porcentagem da área da bacia (extraído de Bacellar, 2005).

Um dos trabalhos mais discutidos na literatura que relaciona a evapotranspiração com diferentes uso e coberturas do solo foi realizado por Zhang *et al.* (1999, 2001) a partir da compilação de 250 trabalhos sobre o consumo de água pela vegetação em diversas regiões do mundo. Segundo os resultados deste estudo, é possível estimar a evapotranspiração média de uma determinada região a partir de informações como o tipo de cobertura vegetal (floresta, herbácea ou mista) e a precipitação média anual (Figura 15). Estes autores afirmaram que as bacias florestadas apresentam maior evapotranspiração em relação às bacias com gramíneas, isto porque existem diferenças significativas no acesso à água contida no solo entre estes tipos vegetacionais. Segundo os autores, as florestas possuem acesso a quantidades maiores de água do volume do solo, pois apresentam sistemas radiculares mais profundos do que plantas herbáceas (Figura 16). A revisão de Canadell *et al.* (1996) sobre sistemas radiculares apontou que, em média, o sistema radicular de árvores alcança no máximo 7 m de profundidade, enquanto para plantas herbáceas esta profundidade é de apenas 2,6 m.

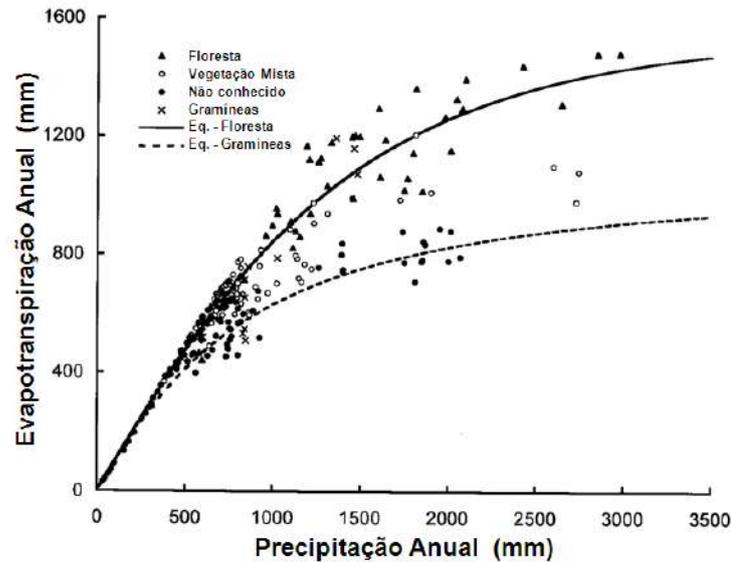


Figura 15 – Relação entre a evapotranspiração anual média e a precipitação anual média para diferentes coberturas vegetais (modificado de Zhang *et al.*, 1999).

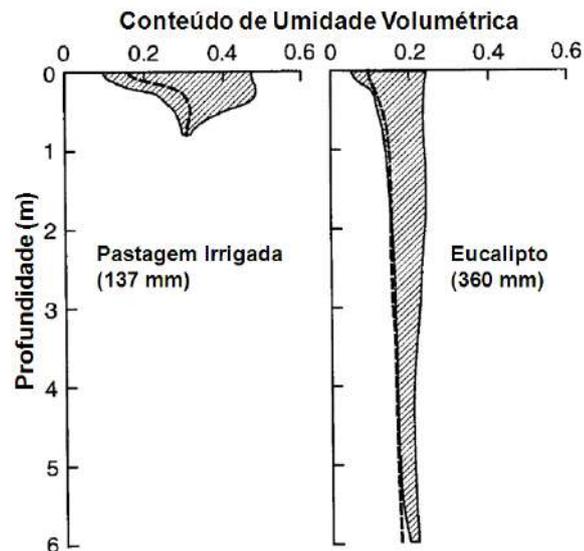


Figura 16 – Perfis característicos de umidade no solo e disponibilidade de água para as plantas. As linhas sólidas marcam o limite superior e inferior de conteúdo de água no solo. Os valores indicam a quantidade de água armazenada no solo (modificado de Zhang *et al.*, 2001).

O modelo de Zhang *et al.* (2001) foi testado a partir da comparação com resultados de diversas revisões sobre bacias pareadas e apresentou um bom ajuste, embora ocorram alguns estudos que não se ajustem ao modelo (Figura 17). Segundo Brown *et al.* (2005), em alguns casos a orientação das encostas (aspecto) influi nestas diferenças entre resultados previstos e obtidos, além de ocorrerem variações em experimentos de desmatamento e florestamento e crescimento após corte. Desta forma, o modelo de Zhang possui um ajuste considerado elevado pelos autores,

embora outros fatores também influenciem os resultados e também não seja indicado para estudos de variação inter-anual nem intra-anual, sendo um indicador de condições médias.

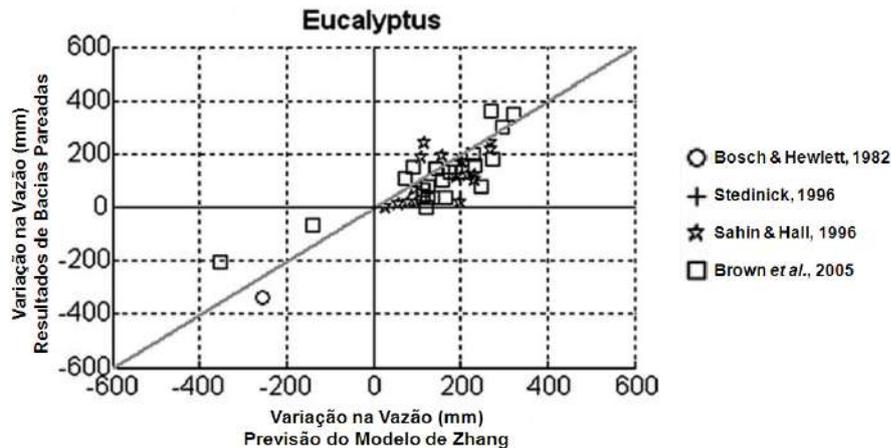


Figura 17 – Comparação da variação da disponibilidade de água segundo o modelo de Zhang e dados de experimentos em bacias pareadas com eucaliptos (modificado de Brown *et al.*, 2005).

Schimel *et al.* (1997) indicaram resultados importantes sobre a eficiência do uso da água<sup>3</sup> na comparação de diferentes coberturas vegetais. Segundo este trabalho existe uma relação direta entre a produtividade dos ecossistemas e o consumo de água (Figura 18), sendo os ecossistemas mais produtivos aqueles que mais consomem água. No entanto, uma outra relação fundamental estabelecida, aponta para uma maior eficiência de uso da água em ambientes florestais do que em áreas de gramíneas. Isto se traduz em maior produção de biomassa consumindo a mesma quantidade de água. Dados médios apontam para a produção de 0,8 Kg.m<sup>-3</sup> de água transpirada em ambientes florestais, enquanto em ecossistemas de savana esta relação cai para 0,2 Kg.m<sup>-3</sup>.

No entanto, esta relação não se mostrou válida apenas na comparação de tipos vegetacionais distintos. Em um estudo sobre plantios de eucalipto utilizando indivíduos clonais<sup>4</sup> ao longo de um transecto de umidade no estado da Bahia, Stape *et al.* (2004) indicaram elevada eficiência na produção de biomassa em relação à utilização de recursos (água, nutrientes do solo, radiação fotossinteticamente ativa), especialmente em locais onde não existem limitações hídricas. Estes autores

<sup>3</sup> Eficiência do Uso da Água: é a quantidade de biomassa produzida por unidade de água consumida (transpirada), segundo Schimel *et al.* (1997).

<sup>4</sup> Clones: indivíduos de composição genética idêntica.

avaliaram 14 plantios submetidos a um gradiente pluviométrico de 1600 mm a 600 mm e observaram que um incremento de 100 mm anuais provocava um aumento de produtividade de 2,3 Mg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Estes autores também relatam que os plantios mais produtivos apresentavam maior consumo de recursos, muito embora este consumo fosse realizado mais eficientemente, isto é, com maior produção de biomassa por quantidade de recurso utilizado (Figura 19).

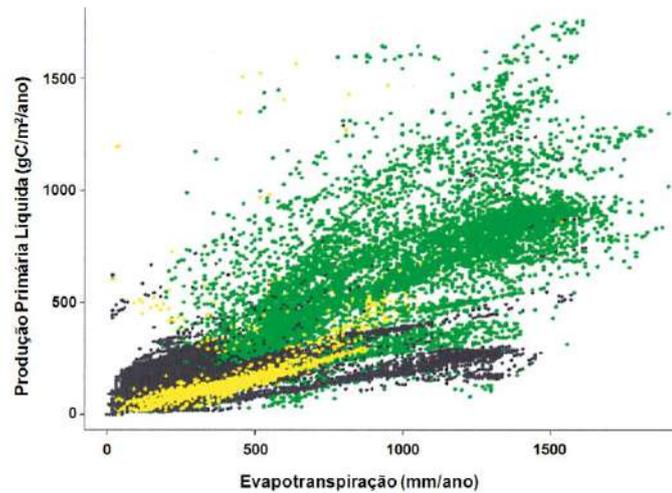


Figura 18 – Relação entre o consumo de água (evapotranspiração) e a produtividade (produção primária líquida) de ambientes florestas (pontos verdes), gramíneas (pontos amarelos) e vegetação mista (pontos pretos) (modificado de Schimel *et al.*, 1997).

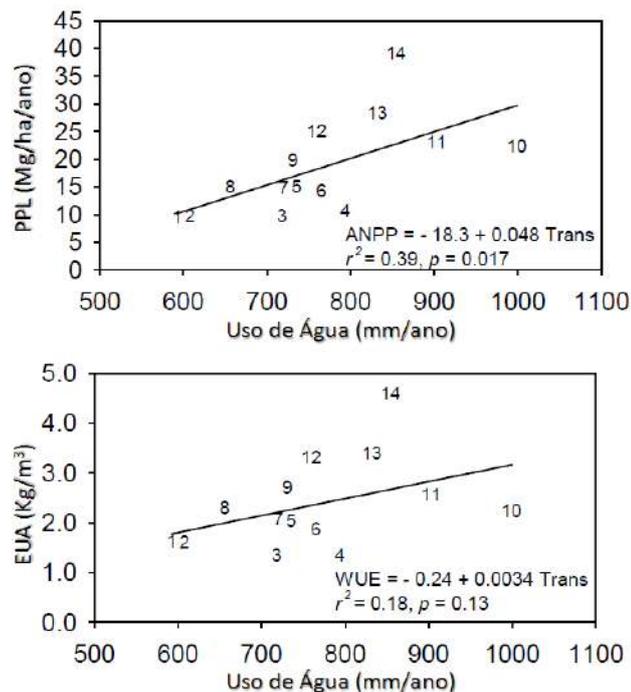


Figura 19 – (a) Relação entre a produtividade primária líquida acima do solo (PPL) e o uso da água. (b) relação entre a eficiência do uso da água (EUA) e o uso da água (modificado de Stape *et al.*, 2004).

### 3.6 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS PLANTIOS DE EUCALIPTO

Os principais enfoques na discussão a respeito dos impactos dos plantios estão direcionados a quatro questões: 1ª) questões hidrológicas e erosivas, relacionadas com as alterações quanti- e qualitativa das águas e de perda de solo; 2ª) questões de nutrição no solo, relacionadas com ciclagem de nutrientes nos plantios; 3ª) questões de diversidade biológica, enfocadas nas comunidades animais e vegetais e suas relações com os plantios de eucalipto; e 4ª) questões sociais, direcionadas às alterações sociais provocadas pela introdução dos plantios e de toda a estrutura que acompanha a implementação da atividade de silvicultura.

Sobre as questões de nutrição do solo, o estudo de Louzada *et al.* (1997) realizado no Brasil aponta que tanto a serrapilheira do eucalipto como as próprias condições ambientais (microclima e fauna decompositora) dos plantios de eucalipto propiciam menores taxas de decomposição na comparação com a serrapilheira e o ambiente das florestas secundárias semidecíduais. Outros estudos também apontam para a influência de fatores internos (qualidade da serrapilheira) nas taxas de decomposição das espécies de eucalipto (GUO e SIMS, 2001a), assim como a importância dos fatores externos (luminosidade, temperatura, umidade e aplicação de efluentes) nestas taxas nos plantios de eucalipto (GUO e SIMS, 2001b, 2002). Ribeiro *et al.* (2002) avaliaram as taxas de decomposição da serrapilheira de diferentes talhões de um plantio de eucalipto que receberam tratamentos diferentes (controle, irrigação, fertilização e irrigação + fertilização). Embora existissem diferenças na qualidade da serrapilheira entre os tratamentos, com maiores concentrações de Nitrogênio e Fósforo nos tratamentos que receberam fertilização e irrigação, as taxas de decomposição da serrapilheira não apresentaram diferenças significativas entre os diferentes tratamentos, o que indica que a variabilidade da qualidade da serrapilheira não influenciou nas taxas de decomposição do material.

São frequentes os questionamentos sobre o impacto dos plantios de eucalipto na diversidade biológica, sendo muitas vezes relacionados com o fato dos eucaliptos serem espécies exóticas em muitos dos locais onde os plantios foram realizados (LIMA, 1996). De forma geral, os plantios realizados com espécies exóticas apresentam menor riqueza e diferente composição de espécies (fauna e flora) do que as florestas nativas substituídas. Entretanto, quando esta substituição é realizada por áreas que não apresentavam florestas, esta mudança pode trazer benefícios uma vez

que se forma um ambiente florestal, muito embora esta mudança dificilmente favoreça às espécies características do uso antecedente (POORE e FRIES, 1985). Além da exotividade, tem-se debatido bastante a respeito da exclusão competitiva<sup>5</sup> de outras espécies vegetais em função da competição por luz, nutrientes e água no solo, assim como pela presença de substâncias alelopáticas<sup>6</sup> na serrapilheira produzida pelos eucaliptos. Entretanto, muitos resultados obtidos por diferentes estudos contradizem estes questionamentos.

Plantios introduzidos por programas de fomento em fase de exploração têm apresentado significativo desenvolvimento de espécies florestais nativas no sub-bosque, sugerindo um processo sucessional favorável à recuperação da biodiversidade (REZENDE *et al.* 1994). Estudo conduzido por Zhou *et al.* (2002) na China indicam que espécies de eucaliptos podem ser utilizadas em estratégias de recuperação de áreas degradadas desde que seu plantio seja realizado em consórcio com espécies nativas e que o sub-bosque e a camada de serrapilheira não sejam alteradas. Estes autores observaram que o plantio de eucalipto estudado apresentou redução da temperatura do ar e da erosão em relação à área controle com solo exposto e que, ao ser impedida a remoção de serrapilheira pela população, ocorreu a revegetação do sub-bosque com espécies herbáceas e arbustivas cobrindo 65% da área. Fabião *et al.* (2002) em estudo realizado em Portugal indica que o manejo florestal influencia na riqueza de espécies do sub-bosque dos plantios de eucalipto, sendo que os maiores valores de riqueza de espécies ocorreram nos locais onde os resíduos dos plantios anteriores foram removidos e o solo não sofreu distúrbios, podendo ser observadas até 16 espécies nestes sub-bosques. No município de Resende/RJ em área de colinas, Sato *et al.* (não publicado) observaram uma cobertura de aproximadamente 35% do sub-bosque de um plantio de eucalipto por mais de 40 morfoespécies. Estudo conduzido em área de cerrado em Minas Gerais indica que a regeneração de sub-bosques em plantios homogêneos tem estreita dependência de florestas vizinhas, além da forma de dispersão das espécies vegetais e do efeito de borda (NERI *et al.*, 2005). Estes autores indicam uma riqueza de 47 espécies, sendo que a maior riqueza de espécies foi observada na borda do plantio,

---

<sup>5</sup> Exclusão competitiva: uma situação na qual a sobreposição de nichos é tão grande e a competição é tão intensa que uma espécie exclui a outra de uma determinada área.

<sup>6</sup> Substâncias alelopáticas: substâncias químicas produzidas por alguns vegetais que inibem o crescimento de indivíduos da mesma espécie ou de outras espécies vegetais (extraído de Raven *et al.*, 2001).

o que os autores relacionam com uma maior dificuldade de dispersão dos indivíduos para o interior do plantio em virtude do predomínio de espécies anemocóricas<sup>7</sup>. Scarano *et al.* (1998), em estudo realizado no Sudeste do Brasil, indicaram uma riqueza de 123 espécies no sub-bosque de uma área com eucaliptos de dez anos de idade, enquanto nos fragmentos vizinhos de floresta Atlântica ocorrem 124 espécies. Esses autores relacionam a recuperação dessa área ao sombreamento feito pelos eucaliptos, à interrupção dos distúrbios humanos e à existência de uma área fonte de sementes relativamente próxima (Parque Estadual do Rio Doce).

Sobre a diversidade da fauna, a contagem de ácaros e colêmbulas realizada por Louzada *et al.* (1997) na comparação da floresta semidecidual com o plantio de eucalipto evidenciou a menor densidade destes artrópodes na serrapilheira do eucalipto, o que traria implicações negativas à decomposição deste material. Em média, a densidade de ácaros foi 44 vezes maior e a de colêmbulas 33 vezes maior na serrapilheira da floresta na comparação com a do plantio de eucalipto. Estudo de Pellens e Garay (1999), realizado na formação Barreiras no estado do Espírito Santo comparando plantios de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* com a floresta primária, indica que a maior parte dos grupos taxonômicos de macro-artrópodes avaliados apresentaram densidade semelhantes ou até maiores nos plantios na comparação com a floresta primária. Entretanto, as autoras destacam que embora os dois plantios avaliados propiciem um ambiente favorável à comunidade de macro-artrópodes, melhores condições são oferecidas pelos plantios de *Acacia*. Isto ocorre devido ao maior estoque de serrapilheira rica em nutrientes, o que resulta em menor variação sazonal da densidade de artrópodes e maior densidade de alguns grupos (*Blattaria*, *Isopoda*, larvas de *Coleoptera* e *Lepidoptera*) em relação ao plantio de eucalipto.

Bragança *et al.* (1998) avaliam o efeito da proximidade de fragmentos de floresta nativa com plantios de eucalipto em relação às populações de insetos dos táxons *Hymenoptera* e *Lepidoptera*. Segundo estes autores, algumas espécies de lepidópteros atuam como pestes dos plantios de eucalipto, provocando a defoliação, enquanto espécies de himenópteros podem atuar como predadores destes lepidópteros, proporcionando assim um controle biológico destas pestes. Os resultados deste trabalho indicam que existe maior ocorrência de lepidópteros

---

<sup>7</sup> Dispersão anemocórica: dispersão de sementes pelo vento.

parasitas no interior dos plantios de eucaliptos, enquanto na transição para o ambiente de floresta nativa e no interior desta floresta a ocorrência é menor. Já com relação aos himenópteros o padrão é inverso, com tendência de redução da ocorrência destes insetos no transecto da floresta nativa em direção ao interior do plantio de eucalipto. Bragança *et al.* (*op. cit.*) apontam que o estabelecimento e/ou a manutenção de fragmentos de floresta nativa próximo aos plantios de eucalipto pode favorecer à melhor distribuição dos himenópteros, contribuindo assim para o controle biológico dos lepdópteros que parasitam os plantios. Estudo realizado na Austrália que compara a densidade de ácaros presentes no solo e na serrapilheira de um plantio de uma espécie exótica de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) com uma floresta natural de *Eucalyptus marginata* e uma área de pastagem aponta que o plantio do eucalipto exótico apresenta maior diversidade de ácaros na comparação com as pastagens. No entanto, a diversidade é menor no plantio do que na floresta natural de eucaliptos, sendo esta relação explicada pela menor idade do plantio, pelo fato da espécie de eucalipto presente no plantio ser exótica e por este plantio ser homogêneo e mono-específico, o que limitaria o aumento da biodiversidade de ácaros nos plantios.

Por sua vez, as consequências sociais compõem uma temática de suma importância no que diz respeito aos questionamentos direcionados aos plantios de eucalipto no Brasil e no mundo. Embora reconhecida como relevante, este tema é abordado de forma bastante superficial nos trabalhos de Poore e Fries (1985) e Lima (1996). No trabalho publicado por Calixto e Ribeiro (2007) sobre a implantação de plantios de eucalipto no Alto Jequitinhonha/MG observou-se as visões de três atores sociais envolvidos neste processo: as empresas reflorestadoras, os agricultores familiares e o setor público. Segundo Calixto e Ribeiro (*op. cit.*), a implantação dos plantios de eucalipto no Alto Jequitinhonha foi estimulada pelo governo militar na década de 1970 visando abastecer com matérias primas a indústria siderúrgica e de celulose e papel, além de apresentar um discurso desenvolvimentista para uma das regiões mais pobres do Brasil. De acordo com os autores, esta política de estímulo à silvicultura na região levou a uma tensão entre as empresas que realizavam os plantios e os agricultores familiares, isto porque, com a implantação dos plantios de eucalipto, ocorreu uma ruptura da relação que os agricultores familiares possuíam com as áreas de chapada. Segundo eles, os agricultores cultivavam as porções baixas do relevo, localmente conhecidas como “grotas”, enquanto as áreas porções mais elevadas e tabulares (“chapadas”) eram utilizadas como áreas de uso comum, onde

os agricultores criavam seus animais à solta, obtinham lenha, plantas medicinais e frutos para complemento da dieta e da economia familiar. A ocupação das chapadas pelos plantios de eucalipto, além de trazerem impactos ambientais, como a homogeneização do ambiente, redução da biodiversidade, destruição de habitats e redução dos recursos hídricos, também provocou a expropriação parcial dos agricultores da região. Calixto e Ribeiro (2007) indicam que a silvicultura nesta região é menos eficiente que a agricultura familiar anteriormente empregada, visto que absorveria menor quantidade de mão-de-obra e traria menos divisas à economia local.

Neste mesmo estudo, outro problema apontado se relaciona com a concentração fundiária, que anteriormente à década de 1970 apresentava-se com mais da metade das terras (65% da área total estudada) distribuída em propriedades menores que 100 ha, enquanto as propriedades maiores que 1000 ha respondiam por apenas 5% da área total. Já no ano de 1996 a relação se inverteu, com 31,94% da área total distribuída nas pequenas propriedades (< 100 ha) e 48,18% concentradas nas grandes propriedades (> 1000 ha). Por último, os autores também criticam o fato de que os efeitos econômicos positivos gerados pela cadeia produtiva relacionada com os plantios de eucalipto no Alto Jequitinhonha não são observados pela população local, sendo transferidos para outras regiões. Este trabalho realizado no Norte de Minas Gerais traz algumas das principais discussões acerca dos impactos sociais dos plantios de eucalipto, o que serve como retrato das discussões que são levadas em outras regiões do país, como o Sul da Bahia, Espírito Santo, São Paulo, Rio Grande do Sul, entre outras, devendo ser salientada as particularidades de cada forma de implementação da silvicultura nestas diferentes regiões.

Os questionamentos sobre as alterações hidrológicas e erosivas dos plantios de eucalipto provavelmente compõem a temática mais discutida dentre todas as apontadas anteriormente. Grande parte dos trabalhos de compilação de resultados feitos por Lima (1996) e Poore e Fries (1985) é dedicada a esta temática e o livro organizado por Lima e Zákia (2006) é integralmente direcionado à relação das florestas plantadas e a água. A revisão de Andréassian (2004) traz uma perspectiva histórica das discussões que buscam uma relação entre as florestas e a água, indicando como as abordagens mais românticas e emotivas sobre o tema evoluíram para o debate científico. Segundo este autor, as primeiras alusões à relação das florestas com a água foram feitas no século I D.C. por Pliny o Velho, que já buscava entender as alterações nas vazões dos rios e no regime de chuva em função do

desmatamento das florestas, muito embora estas relações fossem elaboradas sem um critério científico. Já as primeiras comparações com bases científicas foram feitas por Belgrand na década de 1850, nas quais foi analisado o comportamento hidrológico de três bacias de drenagem com características distintas através das variações do nível dos rios ao longo do tempo.

Estudos hidrológicos em áreas de eucalipto demonstram grande variabilidade de resultados, refletindo, em parte, a grande variabilidade interna existente dentro deste grupo monofilético<sup>8</sup>, que atualmente comporta mais de 600 espécies descritas. Além das espécies que surgiram através do processo de seleção natural, existem tantas outras variações, muitas delas híbridas, que foram desenvolvidas visando o melhoramento genético para o aumento da produtividade dos plantios. Cabe aqui também ressaltar que existem muitos estudos hidrológicos realizados em plantios de eucalipto e uma outra gama de estudos realizados em florestas naturais de eucalipto, especialmente na Austrália. Além da diversidade das espécies de eucalipto observadas em cada uma dessas áreas, torna-se muitas vezes difícil extrapolar os resultados dos plantios para as florestas naturais ou vice-versa, uma vez que elas apresentam condicionantes muito distintos.

Neste sentido, muitas florestas naturais de eucaliptos apresentam indivíduos com mais de cem anos, existe uma variabilidade etária dos indivíduos que compõem estas florestas, o espaçamento entre eles não é regular, existe uma riqueza de espécies que compõe estas florestas e elas não estão submetidas às técnicas de manejo silviculturais que visam aumentar a produtividade, o que, definitivamente, não ocorre com os plantios de eucalipto. De modo geral, ao menos nos plantios que serão abordados neste estudo, os plantios de eucalipto são mono-específicos, clonais, apresentam idade e espaçamento uniforme, possuem estradas não-pavimentadas distribuídas pela área, geralmente apresentam rotações inferiores a oito anos, ocupam somente os divisores de drenagem e as encostas laterais e apresentam adubação e controle de pragas e competidores de forma intensiva.

Realizadas estas ressalvas, uma revisão clássica que trata das implicações das mudanças de cobertura do solo na hidrologia de bacias de drenagem foi conduzida por Hibbert (1965) e traz a primeira revisão dos estudos conduzidos pelo método de

---

<sup>8</sup> Grupo monofilético: conjunto de organismos que possui um mesmo ancestral em comum e todos os seus descendentes.

bacias pareadas. Este autor concluiu que: 1º) a redução na cobertura florestal aumenta o deflúvio; 2º) o estabelecimento de cobertura florestal em áreas de vegetação esparsa diminui o deflúvio; e 3º) as respostas das bacias de drenagem aos tratamentos de desmatamento e vegetação são muito variáveis, e, na maioria dos casos, imprevisíveis.

Bosch e Hewlett (1982) também realizaram uma revisão semelhante à de Hibbert (1965) acrescentando 55 casos aos já 39 avaliados por este último autor, totalizando 99 estudos revisados. Bosch e Hewlett (*op. cit.*) concluíram que as duas primeiras conclusões de Hibbert (*op. cit.*) continuavam condizentes com o seu levantamento, que o desmatamento aumentaria o deflúvio das bacias e que a vegetação de áreas anteriormente desprovidas de cobertura vegetal ou com cobertura esparsa reduziria o deflúvio destas áreas. Sobre a terceira conclusão, estes autores conseguiram observar um padrão de resposta às alterações de cobertura em relação à precipitação média anual das áreas avaliadas. Eles concluíram que quanto maior a precipitação média anual das áreas, maior é a resposta de aumento de deflúvio em relação ao desmatamento e que a redução de deflúvio que se segue a revegetação das bacias é proporcional à taxa de crescimento da vegetação, enquanto o aumento de deflúvio devido ao desmatamento diminui à medida que a vegetação se regenera. De acordo com estes autores, o único caso que contradiria a conclusão de que o desmatamento de uma área aumentaria o deflúvio dos canais seria o estudo de Langford (1976) que enfoca o efeito de um incêndio numa floresta de *Eucalyptus regnans* na Austrália. Neste estudo foi observada a ocorrência de um grande incêndio numa floresta natural de *Eucalyptus regnans* na Austrália, sendo que após este incêndio ocorreu uma vigorosa germinação de sementes, o que levou a uma grande regeneração de mudas. Este autor concluiu que não houve nenhum aumento significativo no deflúvio dos rios imediatamente após a queimada e que teria ocorrido uma redução do deflúvio de três a cinco anos após o incêndio, quando a regeneração a vegetação estava acontecendo.

Outro estudo clássico realizado na mesma área de estudo que o de Langford (*op. cit.*) foi elaborado por Kuczera (1987) e traz uma relação das florestas de eucalipto e o deflúvio dos rios. Segundo o modelo deste autor, após o incêndio observa-se inicialmente um curto período de aumento no deflúvio dos rios (2 – 3 anos), o que contradiz os resultados de Langford (1976), visto que este último autor não relata nenhum aumento do deflúvio dos rios nos primeiros anos após a ocorrência do

incêndio florestal. Após este aumento do deflúvio nos primeiros anos seria estabelecido um longo período de decréscimo, que chegaria ao seu mínimo com cerca de 15 – 20 anos após o incêndio. Esta queda no deflúvio não estaria relacionada com a remoção da floresta madura, mas sim com a sua substituição por uma vegetação mais nova e com crescimento mais acelerado e que demandaria maiores quantidades de água. Após esta tendência de queda, o deflúvio passaria a aumentar lentamente à medida que a idade da floresta avança.

As conclusões de Vertessy *et al.* (2001) corroboram o modelo hidrológico de Kuczera (1987). Segundo estes autores, considerando o conjunto dos eucaliptos e o sub-bosque, haveria uma redução da transpiração das florestas de eucalipto dos nove anos em diante, e a interceptação das chuvas também tenderia a ser reduzida a partir dos 40 anos da floresta, o que acarretaria no aumento da vazão à medida que a vegetação envelhece (Figura 20). Dados trazidos por Roberts *et al.* (2001) corroboram os dados de transpiração das florestas trazidos por Vertessy *et al.* (2001). Roberts *et al.* (*op. cit.*) comparam a transpiração de florestas de *Eucalyptus sieberi* com 14, 45 e 160 anos de idade e observam que a transpiração tende a diminuir com a idade. Sendo assim, a transpiração estimada pelos autores para esta floresta natural de eucaliptos foi de 2,2 mm/dia na floresta com 14 anos de idade, 1,4 mm/dia com 45 anos e 0,8 mm/dia com 160 anos de idade.

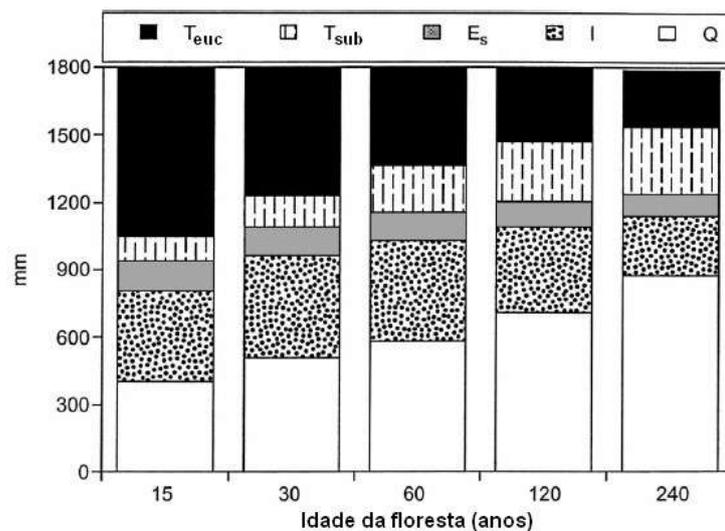


Figura 20 – Estimativa do balanço hídrico das florestas de *Eucalyptus* na bacia Maroondah/Austrália com 15, 30, 60, 120 e 240 anos de idade. É assumida uma precipitação anual de 1800 mm.  $T_{euc}$  representa a transpiração média anual do estrato arbóreo da floresta de *Eucalyptus*,  $T_{sub}$  indica a transpiração média anual do sub-bosque,  $E_s$  indica a evaporação média anual do solo e da serrapilheira,  $I$  representa a interceptação média anual e  $Q$  a vazão média anual. Modificado de Vertessy *et al.* (2001).

Sobre o controle da transpiração dos plantios de eucalipto, existem estudos que comprovam que as espécies plantadas no Brasil possuem resposta estomática<sup>9</sup> à disponibilidade de água (LIMA *et al.*, 2003; SOARES e ALMEIDA, 2001; MIELKE *et al.*, 1999), indicando que essas espécies apresentam mecanismos que controlam a transpiração em condições de baixa umidade no solo. Um estudo que avalia o uso de água entre diferentes ecossistemas foi realizado por Lima *et al.* (1990), que compara áreas de cerrado, plantios de *Pinus* e plantio de *Eucalyptus*. Estes autores afirmam que os valores de evapotranspiração anual são de 577, 717 e 922 mm, respectivamente, que significa uma diferença de evapotranspiração da ordem de 345 mm por ano na comparação da vegetação de cerrado e o plantio de *Eucalyptus grandis*.

Em contraponto ao senso comum, o estudo de Almeida e Soares (2003) conclui que em plantios de *Eucalyptus grandis* na costa Leste do Brasil a evapotranspiração anual e o uso de água do solo são comparáveis às áreas de floresta Atlântica, demonstrando as contradições encontradas nos resultados a respeito dos efeitos dos plantios de eucalipto no ciclo hidrológico. Embora alguns estudos apontem semelhança na utilização de água entre plantios de eucalipto e a floresta Atlântica, os resultados obtidos por Stape *et al.* (2004) indicam elevada eficiência na produção de biomassa em relação à utilização de recursos (água, nutrientes do solo, radiação fotossinteticamente ativa), especialmente em locais onde não existem limitações hídricas. Hubbard *et al.* (2010) comparam a eficiência de utilização da água em dois plantios de eucalipto, um da empresa Aracruz no Espírito Santo e outro da empresa Veracel no estado da Bahia. A produtividade do plantio da Aracruz era menor que o da Veracel e em ambos foram realizados experimentos em talhões com e sem irrigação. Os resultados demonstram que no período avaliado os talhões irrigados de ambos os plantios transpiraram mais água que os talhões não-irrigados, muito embora não tenham existido diferenças na eficiência da utilização de água entre os talhões irrigados e não-irrigados dos plantios estudados. Os autores discutem estes resultados contrastantes da eficiência do uso da água com os de Stape *et al.* (2004) através da não existência de um período de escassez de água no período avaliado,

---

<sup>9</sup> Estômatos são aberturas microscópicas na epiderme dos vegetais, cada uma circundada por duas células-guarda, as quais mudam seu formato para conduzir à abertura ou ao fechamento dos poros. Essas mudanças de forma dos estômatos ocorrem em função das respostas das células-guarda a diversos estímulos, as quais recebem o nome de respostas estomáticas.

uma vez que o período estudado apresentou índices pluviométricos acima da média histórica, o que não acarretaria diferenças na produtividade dos talhões em virtude da irrigação.

Ainda sobre o balanço hídrico de bacias de drenagem, os resultados de Sharda *et al.* (1998) em um estudo de bacias pareadas com plantios de eucaliptos na Índia apontam reduções nos deflúvios anuais e no fluxo de base dos rios com a substituição das áreas de gramíneas por plantios, além das diferenças entre a 1ª rotação do plantio e a 2ª rotação (rebrotas). De acordo com estes autores foram após a implantação dos plantios ocorreu uma diminuição de 16% no deflúvio anual e de 15% no fluxo de base dos rios durante a 1ª rotação, enquanto na 2ª rotação estas reduções foram de 25,4% e 27%, respectivamente. A maior utilização de água pelo plantio durante a 2ª rotação está relacionada com o espraiamento do sistema radicular, o que aumentou a capacidade de absorção de água do plantio, resultando, inclusive, na produção de 42% mais biomassa nesta rotação, muito embora estas raízes não tenham utilizado água da zona saturada do solo. Lane e Mackay (2001) avaliam os impactos do corte de parte de uma floresta de eucaliptos em duas bacias de drenagem no Sudeste da Austrália. Os autores observam um aumento do deflúvio logo após o corte em ambas as bacias, assim como 10% de aumento nos três anos seguintes ao tratamento numa das bacias e de 31% nos quatro anos seguintes na outra bacia. Estas diferenças de aumento de deflúvio após o tratamento estão relacionadas com a regeneração da vegetação, visto que a bacia que apresentava maiores aumentos exibiu uma revegetação muito lenta, enquanto na outra a recuperação dos diversos estratos florestais foi mais rápida e intensa. Após este período de aumento do deflúvio, as bacias apresentaram uma tendência de redução do escoamento dos rios, chegando inclusive a valores inferiores aos anteriores ao tratamento na bacia que exibiu a revegetação mais intensa, enquanto na outra os valores de deflúvio somente retornaram ao patamar pré-tratamento.

Estudo de Sikka *et al.* (2003) avalia o impacto dos plantios de eucalipto nas modificações dos fluxos de base e de picos de vazão dos rios na mesma área estudada Sharda *et al.* (1998). Sikka *et al.* (*op. cit.*) concluíram que os plantios de eucalipto reduziram em 2,0 vezes e 3,5 vezes o fluxo de base na 1ª e 2ª rotação (rebrotas), respectivamente. Os picos de vazão também foram atenuados nos plantios na comparação com a área controle de gramíneas. Resultados semelhantes são descritos por Zhou *et al.* (2002) em plantios de eucalipto no Sul da China, com

resultados que indicam uma redução significativa no fluxo de chuva quando comparados à área controle sem vegetação.

Ram *et al.* (2007) descrevem que em algumas áreas do mundo os plantios de eucalipto têm sido utilizados como técnica para rebaixar os aquíferos onde existem problemas de encharcamento e salinização dos solos. Estes autores trazem os resultados da variação no nível d'água no interior e nas áreas próximas a um plantio de eucaliptos na Índia. Segundo eles, o nível d'água apresentava-se mais rebaixado no interior dos plantios do que nas áreas ao redor (cerca de 90 cm), muito embora os efeitos deste rebaixamento ainda pudessem ser observados em locais afastados até 700 m das bordas dos plantios. Como nesta área as raízes dos eucaliptos absorviam água da franja capilar do solo, o plantio como um todo funcionava como um bombeamento biológico, gerando um efeito similar a um cone de depressão no aquífero devido ao bombeamento.

Zohar e Schiller (1998), também estudando áreas sujeitas à salinização do solo, comparam o uso de água de oito diferentes linhagens de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. occidentalis* em Israel e observaram valores de transpiração superiores à precipitação, o que resultou em um rebaixamento de 1,2 m no nível d'água. Marshall *et al.* (1997) também apontam valores de transpiração superiores à precipitação em um plantio de *Eucalyptus camaldulensis* com 9 anos de idade numa área sujeita à salinização na Austrália, indicando que estes plantios poderiam ser utilizados como estratégia para o rebaixamento dos aquíferos. Zhou *et al.* (2002) acompanharam a oscilação do lençol freático em três áreas distintas: uma área desprovida de vegetação, um plantio de eucalipto e uma floresta mista. De acordo com estes autores a área de floresta mista apresentou rebaixamento de 30 cm no nível d'água na comparação com a área de solo exposto, enquanto no plantio de eucalipto este rebaixamento foi de 80 cm na comparação com esta mesma área, sendo estas diferenças relacionadas com a maior capacidade de absorção de água dos plantios de eucalipto.

Engel *et al.* (2005) avaliaram os efeitos no lençol freático da conversão de uma área de gramíneas nativas por um plantio de *Eucalyptus camaldulensis* nos Pampas argentinos. Segundo estes autores as árvores desta espécie absorveram tanto a água da zona não-saturada do solo como da zona saturada, o que resultou em variações diárias do nível d'água de até 15 cm e no rebaixamento deste nível em comparação com a área de gramíneas. Um dos principais fatores para estas diferenças está

relacionado com a profundidade do sistema radicular, que na espécie de eucalipto estudada é de aproximadamente 6 metros, enquanto das gramíneas é de apenas 1,5 metro.

A qualidade da água nos rios é influenciada pelos processos hidro-erosivos que ocorrem nas encostas. Os resultados de Lima (1990) demonstram que o escoamento superficial nas encostas tende a diminuir ano a ano com o desenvolvimento da vegetação após o plantio, pois a mesma reduziria o impacto das gotas sobre o solo e dificultaria o escoamento superficial. Em seu estudo, durante o primeiro ano nos plantios com espaçamento 3 x 2 m, o escoamento superficial médio foi da ordem de 1,7% e 2,4% (relação escoamento/precipitação) em dois plantios que receberam duas e uma aragem, respectivamente. Com três anos, como os resultados avaliados nesse estudo, o escoamento superficial foi de 0,1% e 0,2%, respectivamente.

Resultados semelhantes foram apontados por Melos *et al.* (2011) em um plantio híbrido de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* no Sudeste do Brasil. Estes autores observaram escoamento de 0,2% nos divisores de drenagem (inclinação de 8°) e 0,7% nas encostas laterais (inclinação de 24°), sendo estes baixos valores relacionados com a espessa camada de serrapilheira existente, que dificultaria o escoamento, e com a injeção concentrada dos fluxos de atravessamento próximo aos troncos, que poderiam utilizar o maior adensamento das raízes nestes locais como vias preferenciais de infiltração. Lane *et al.* (2004) avaliaram o escoamento superficial em experimentos com chuva artificial de alta intensidade (45, 75 e 110 mm.h<sup>-1</sup> e duração de 15, 30 e 60 minutos) em uma floresta de *Eucalyptus regnans* na Austrália que havia sido cortada e queimada. Em todos os experimentos conduzidos pelos autores o escoamento superficial foi ínfimo, indicando que o processo de escoamento Hortoniano não ocorreu, embora existissem evidências de escoamento sub-superficial.

As estradas não-pavimentadas (ENP) constituem-se em importantes áreas fontes de sedimentos para os canais (FAO, 1989). Fredriksen (1970) e Versfeld (1981) verificaram que o aumento do escoamento superficial e da erosão não resulta diretamente das atividades florestais em si, como, por exemplo o corte e desbaste, mas sim dos processos de ocorrência localizada, sendo originados principalmente nas estradas não-pavimentadas. Croke *et al.* (1999) avaliam o escoamento superficial nas estradas abertas para o escoamento das toras de um plantio de eucalipto e as áreas de corte do plantio e encontram diferenças significativas entre estes dois ambientes.

De acordo com os autores, os solos das estradas apresentam elevada densidade e baixa capacidade de infiltração devido à compactação pelas máquinas, o que proporciona a formação de fluxos superficiais hortonianos. De modo geral, os valores de escoamento superficial foram de quatro a nove vezes maiores nas estradas do que nas áreas que receberam corte do plantio, com valores médios que superam 50% na relação do escoamento superficial/precipitação. Os fluxos gerados por estas estradas são desviados para as áreas de plantio através de saídas d'água e os resultados deste estudo demonstram que as áreas de plantio conseguem infiltrar estes fluxos provenientes das estradas, demonstrando que esta técnica de manejo de estradas é eficiente, especialmente em chuvas de baixa intensidade.

Segundo Likens (1985) as práticas de manejo florestal deveriam incluir o menor consumo possível em relação a área/comprimento de estradas não pavimentadas. Machado e Malinovski (1987) apontaram que a falta de planejamento proporcionou uma rede de estradas com densidade média de aproximadamente 90 m/ha nas áreas de plantios florestais. Tal valor é considerado alto, principalmente quando comparada com os padrões internacionais, que sugerem que a rede de estradas deva possuir entre 30 a 40 m/ha (FAO, 1989). Dados de Cornish (2001) relacionam a abertura de estradas em florestas de eucalipto e suas consequências na turbidez da água dos rios que cruzam estas áreas. De acordo com o autor, a abertura de estradas está relacionada com o aumento da turbidez nas bacias estudadas, especialmente naquelas que apresentam um maior número de intersecções entre as estradas e as drenagens.

Ainda sobre a qualidade da água em florestas eucalipto, Hopmans e Bren (2007) em estudo conduzido na Austrália apontam valores médios de turbidez de 1,2 UNT numa bacia de drenagem com floresta natural de eucaliptos, enquanto na outra bacia que apresentava plantio de *Pinus* e uma floresta natural de eucaliptos como mata ciliar o valor médio foi de 4,3 UNT. Sobre a carga de sedimentos, os autores citam que a maior parte dos sedimentos exportados pelas bacias foram produzidos num único evento e que no plantio de *Pinus* a produção de sedimentos por hectare e a turbidez da água foram 34,8 vezes e 10,5 vezes superior à área controle com floresta nativa de eucaliptos, respectivamente. Estudo realizado por Câmara e Lima (1999) num plantio de eucaliptos com 50 anos (4ª rebrota) e há 16 anos sem intervenção silvicultural avalia as alterações na qualidade da água após a realização do corte raso do plantio. Segundo estes autores, o ano seguinte após o corte apresenta um aumento

substancial da carga de sedimentos nos rios da bacia, com valores médios de 28,8  $\text{Kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  nos seis anos anteriores ao corte e de 60,6  $\text{Kg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  no primeiro ano após o corte. A turbidez da água também foi sensivelmente alterada, apresentando maiores valores na comparação do ano pós-corte em relação ao período pré-corte, especialmente no período chuvoso, que foi compreendido entre os meses de novembro e março.

## **4 ÁREA DE ESTUDO**

---

### 4.1 MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL

#### 4.1.1 Geologia

A região estudada está inserida na porção central da faixa Ribeira, ao Sul do Cráton de São Francisco, que foi compartimentada em cinco unidades tectônicas principais: terrenos Ocidental, Oriental, Paraíba do Sul, Embu e Cabo Frio (HEILBRON *et al.*, 2004). A região estudada é abrangida pelos terrenos Paraíba do Sul e Embu, que apresentam orientação dominante NE-SW. Dentro destes terrenos, o grupo Paraíba do Sul é constituído basicamente por gnaisses bandados com intercalações de xistos pelíticos, mármore e rochas calcissilicáticas, enquanto o complexo Embu é composto, principalmente, por gnaisses xistosos com intercalações de quartzitos e rochas calcissilicáticas. Em ambos os terrenos também ocorrem unidades de idade Neoproterozóica como os granitos Campinho, Bananal e Resgate no terreno Paraíba do Sul e complexo Taquaral e granito Campo Alegre-Funil no terreno Embu. Com expressão espacial reduzida, são observadas pequenas áreas de leucogranitos do Cambriano (EIRADO SILVA, 2006).

A faixa Ribeira possui duas fases bem marcadas de grande atividade tectônica: a primeira, que deu origem à sua formação, é dominada por movimentos compressivos da crosta entre o Neoproterozóico e o Ordoviciano, que resultou em grande deformação do orógeno e formação de rochas granitóides e grande metamorfismo, produzindo acentuado encurtamento crustal e formação de estruturas como foliações, lineamentos e dobras. Nesta mesma fase ocorreu um segundo estágio colisional (530 – 510 Ma), que produziram novas deformações, sendo resultante deste novo estágio a formação da megassinforma e a zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul (HEILBRON *et al.*, 1991, 2004); a segunda fase é marcada pela extensão e ruptura do Gondwana com a abertura do Oceano Atlântico, que foi iniciada no Jurássico Superior e Cretáceo Inferior, marcando o início da reativação tectônica desta região, resultando na formação de bacias sedimentares, falhas, fraturas, além de magmatismo. Este processo extensional também foi responsável pela ocorrência de magmatismo alcalino e de um sistema de riftes continental, caracterizado por uma série de falhamentos rúpteis e subverticais. Falhas normais com orientação ENE

definem o limite dos blocos norte das bacias sedimentares Cenozóica (bacias de Resende e Volta Redonda). A falha transtensional mais marcante na região ocorre entre Volta Redonda e Barra Mansa, orientada no sentido NW-SE, sendo também relativa a estes eventos. Trata-se de uma zona de transferência que conectou os *riffts* do Paraíba e da Guanabara, deslocando o eixo da megasinformal do Paraíba, como foi sugerida por Valeriano e Heilbron (1993). Estes eventos também foram responsáveis pela propagação regional de dois conjuntos principais de fraturas sub-verticais orientadas para NE-SW e NW-SE.

#### 4.1.2 Geomorfologia

Regionalmente, a região do médio vale do rio Paraíba do Sul (MVRPS) é caracterizada por duas unidades geomorfológicas: uma montanhosa e escarpada e outra de colinas convexo-côncavas. A área montanhosa corresponde à escarpa interior da Serra do Mar, localmente denominada serra da Bocaina, e à escarpa Sul da serra da Mantiqueira, denominada localmente de serra de Itatiaia. Já a área de colinas está compreendida entre estas duas serras, correspondente ao *graben* do Paraíba do Sul (Figura 21). No domínio montanhoso predominam mecanismos de erosão gravitacional (especialmente deslizamentos translacionais, fluxos detríticos e quedas de blocos), favorecidos pela maior declividade das encostas, enquanto no domínio colinoso são comuns os processos de erosão por exfiltração de água subterrânea (voçorocamento), assim como deslizamentos, tanto por descalçamento da base de taludes por efeito erosivo do escoamento fluvial (AVELAR e COELHO NETTO, 1992a), como pelo avanço regressivo de canais por voçorocamento (FONSECA, 2006).

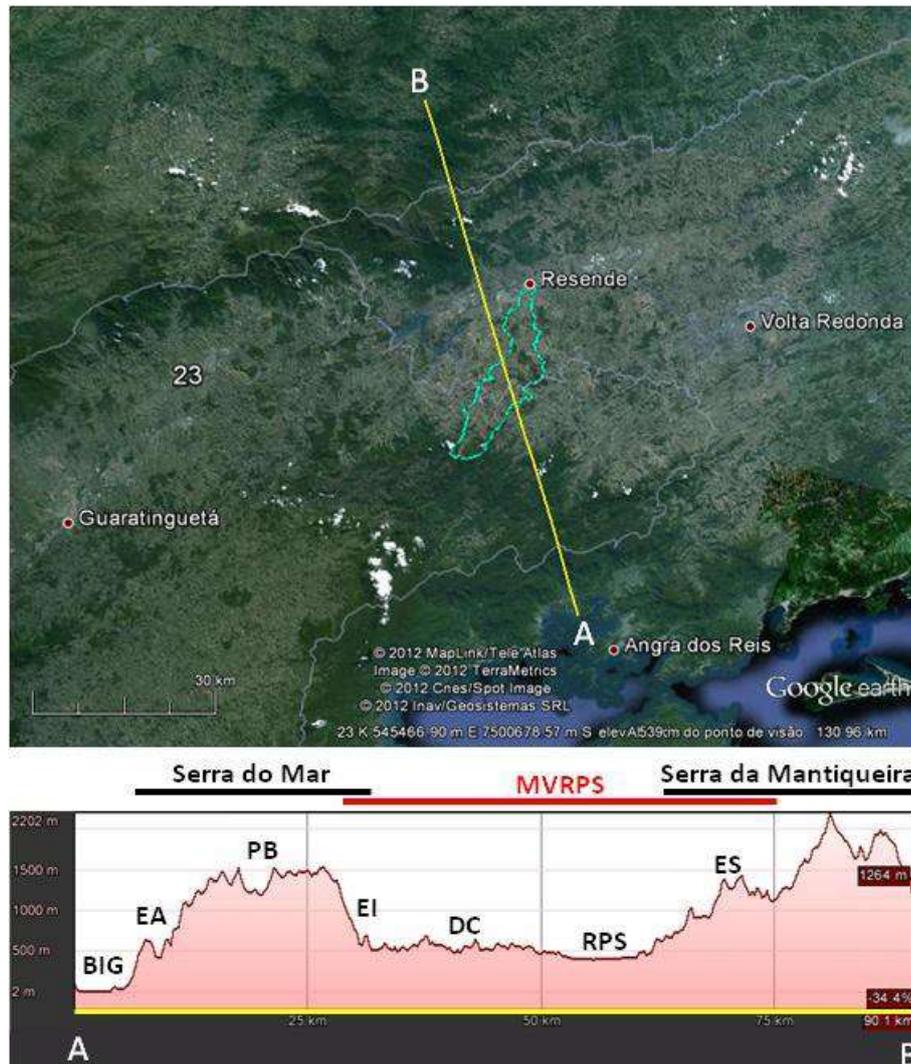


Figura 21 – Transecto topográfico regional. Destacado em azul a bacia hidrográfica do rio Sesmaria. MVRPS: Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, BIG: Baía da Ilha Grande, EA: Escarpa Atlântica, PB: Planalto da Bocaina, EI: Escarpa Interior, DC: Domínio de Colinas, RPS: Domínio do Rio Paraíba do Sul, ES: Escarpa Sul.

Segundo Avelar e Coelho Netto (1992a), a formação de concavidades na bacia do rio Bananal, próxima à bacia do rio Sesmaria e também drenando o reverso da serra da Bocaina, está relacionada com o controle lito-estrutural das fraturas sub-verticais, com grande correspondência entre a orientação do eixo das concavidades e a orientação predominante dos sets de fraturas. O processo de desenvolvimento dessas formas côncavas foi relacionado com a exfiltração da água subterrânea por artesianismo pelas fraturas (Figura 22), sendo este modelo corroborado pelos resultados encontrados em uma concavidade estrutural suspensa (AVELAR e COELHO NETTO, 1992b) e em uma concavidade estrutural ajustada à rede de drenagem (FONSECA, 2006; FONSECA *et al.*, 2006).

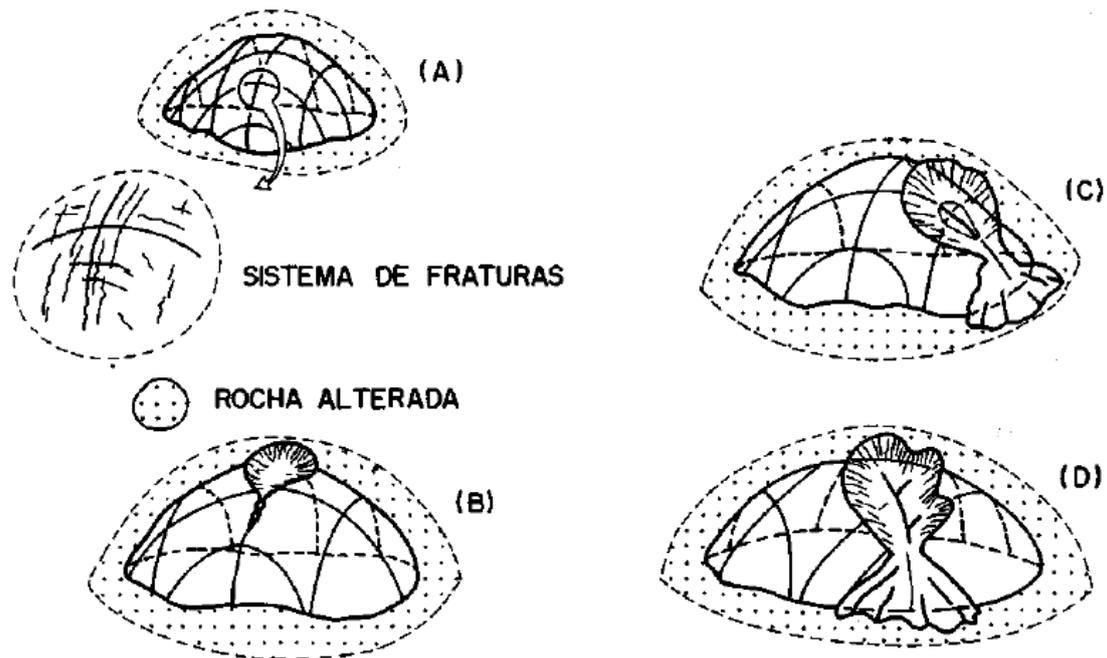


Figura 22 – Modelo de evolução de concavidades estruturais controladas por fraturas na rocha proposto por Avelar e Coelho Netto (1992).

Além da orientação das concavidades estruturais, a herança geológica marcada pelo *strike* das rochas e pelas fraturas e falhas, controlam fortemente a orientação dos principais rios que drenam a escarpa Interior da Serra do Mar. As bacias dos rios Bananal, Barreiro de Baixo e Sesmaria drenam basicamente na orientação NE, seguindo o *strike* das rochas. Algumas mudanças abruptas de direção destes rios relacionam-se com falhas, conforme destacado por Eirado Silva (2006) no médio-baixo curso do rio Sesmaria, onde o rio sofre duas inflexões para NW, antes de chegar à bacia sedimentar de Resende.

#### 4.1.3 Histórico de cobertura do solo e processos erosivos

No MVRPS prevalece uma paisagem heterogênea e instável, submetida a mudanças ambientais cada vez mais rápidas, com grandes variações no que diz respeito ao funcionamento dos geocossistemas (COELHO NETTO, 2003). Datações absolutas realizadas a partir de depósitos colúvio-aluvionares na bacia do rio Bananal indicaram que ocorreu um período de grande atividade hidro-erosiva que durou aproximadamente 2 Kanos entre 10 Ka – 8 Ka A.P. em toda a área levantada (DIETRICH *et al.*, 1991; COELHO NETTO *et al.*, 1994; COELHO NETTO, 1999),

conforme apontado na Figura 23. Este primeiro ciclo erosivo se deu na transição do Pleistoceno para o Holoceno e foi relacionado às alterações climáticas globais evidenciadas em diversos locais do planeta, quando as condições climáticas se tornaram mais quentes e úmidas no Sudeste brasileiro (COELHO NETTO, 1999). O período seguinte foi marcado pela estabilidade dos depósitos, estando esta estabilidade relacionada ao desenvolvimento da Floresta Ombrófila na paisagem até então dominada por um bioma tipo savana (cerrado).

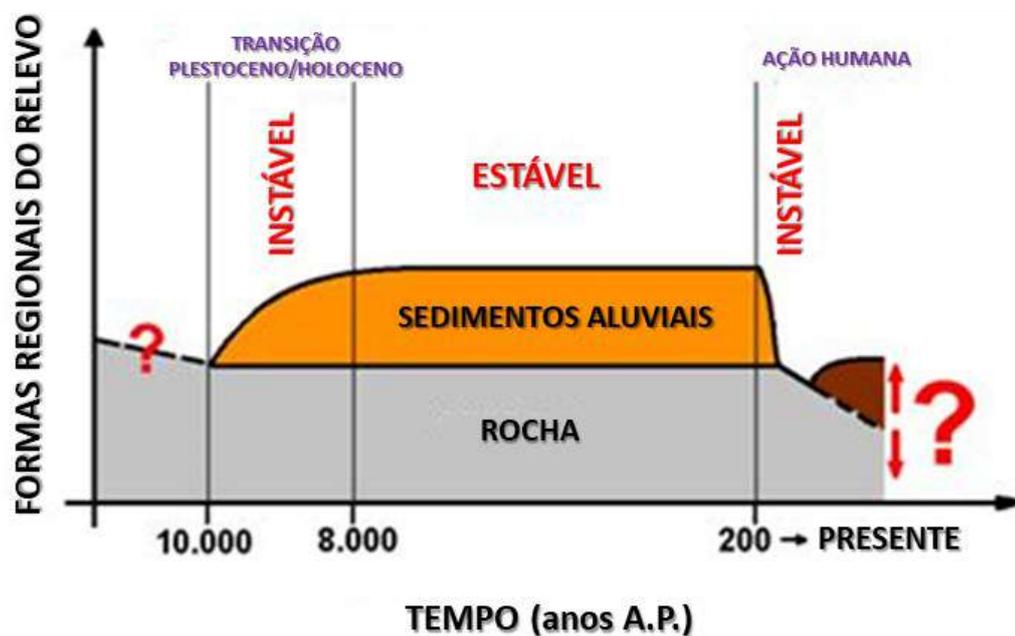


Figura 23 – Esquema de evolução regional alternando períodos de instabilidade morfo-dinâmica em resposta a mudanças climáticas globais na transição Pleistoceno-Holoceno e mais recentemente em função de alterações por ação humana (modificado de COELHO NETTO, 1999).

A estabilidade deste período de aproximadamente 8 Ka foi rompida a partir do século XVIII, quando extensas áreas de floresta do MVRPS foram desmatadas para a inserção da atividade cafeeira, deixando como remanescentes alguns fragmentos florestais no domínio colinoso e áreas mais contínuas de floresta no domínio montanhoso. A substituição das áreas de floresta Atlântica por plantios de café resultou na modificação de um sistema hidrológico que operava através dos processos de infiltração e estocagem (COELHO NETTO, 1985) por outro em que preponderava o escoamento superficial, gerando altas taxas de erosão (DANTAS, 1995). Estudo conduzido por Dantas e Coelho Netto (1996) indicou que a taxa de sedimentação na bacia do rio Piracema, afluente do rio Bananal, foi de da ordem de

1.485 m<sup>3</sup>/Km/ano na transição Pleistoceno-Holoceno, enquanto no período da atividade cafeeira a taxa foi significativamente maior, da ordem de 3.737 m<sup>3</sup>/Km/ano. O aumento da erosão das encostas certamente acarretou maior carga de sedimentos nos canais, especialmente se for levado em consideração que os plantios de café deixavam grande parte do solo descoberto e feitos “morro abaixo”, com lineamento dos pés no sentido das linhas de maior declividade das encostas. Esse aumento do escoamento superficial nas encostas e da carga de sedimentos foi apontado por Coelho Netto (1999) como a principal razão para a incisão vertical (degradação do leito) dos principais rios coletores, que se refletiu na abertura de faces de exfiltração de água nos complexos de rampa oriundos das cabeceiras de drenagem, o que teria iniciado os processos de voçorocamento. Entretanto, uma questão que não foi enfatizada por Coelho Netto (*op. cit.*) diz respeito a uma possível ascensão do nível d'água regional em virtude da redução da evapotranspiração na conversão da floresta nativa por cafezais. Esta alteração de cobertura do solo poderia favorecer ao aumento da vazão dos canais fluviais (veja seção 3.5), sendo este aumento da vazão também responsável pela incisão vertical do fundo dos canais que corriam sobre os depósitos da transição Pleistoceno-Holoceno. Esta possível elevação regional do nível d'água subterrâneo associada à degradação do fundo dos canais fluviais poderia atuar conjuntamente na iniciação dos processos de voçorocamento.

Após o ciclo do café, a pecuária extensiva espalhou-se pelo vale ao longo do século XX, acarretando novas alterações no que diz respeito à hidrologia. Isto ocorreu devido às descontinuidades hidrológicas observadas na base do sistema radicular das gramíneas utilizadas como pasto (gênero *Brachiaria*). Cambra e Coelho Netto (1998) detectaram redução de uma ordem de grandeza na condutividade hidráulica saturada na comparação do interior do sistema radicular ( $1,26 \times 10^{-4}$  cm/s) para o solo abaixo da zona de raízes ( $4,45 \times 10^{-5}$  cm/s). Deus (1991) também apontou a importância hidrológica da atuação das formigas saúva (gênero *Atta*), criando uma densa rede de dutos, que podem se estender por 500 m de raio a partir da região central do formigueiro, além de atingir profundidades de até três metros. A água entra nestes dutos tanto a partir dos “olheiros”, aberturas superficiais, que atuam como ralos, assim como pela percolação descendente, sendo conduzidas para o interior destes túneis, permitindo formar um escoamento subsuperficial de elevada velocidade. Existem evidências que este processo facilita a formação de uma zona saturada suspensa na

base de depósitos Quaternários, que possuem alta permeabilidade, conduzindo a exfiltração nas faces expostas das voçorocas.

Na bacia do rio Piracema, principal afluente do rio Bananal, foram mapeadas 128 voçorocas 87% destas (N = 111) conectadas à rede de drenagem, enquanto 13% destas (N = 17) estavam desconectadas da rede de drenagem no ano de 2005 (LEAL, 2009). As voçorocas ativas respondiam por 28% das ocorrências mapeadas (N = 36) e as inativas totalizavam 72% (N = 92). Na comparação com o levantamento realizado por Cambra (1995) a partir de fotografias aéreas 1973, que apontou que 29% das voçorocas estavam ativas e 88% conectadas à rede de drenagem, verifica-se que não ocorreram variações nos percentuais. Entretanto, isto não significa que havia uma estabilidade no estado das voçorocas, uma vez que algumas voçorocas mapeadas em 1973 como ativas encontravam-se estabilizadas em 2005, enquanto outras cabeceiras de drenagem que não apresentavam canais em 1973 passaram a apresentar voçorocas em 2005. Segundo Leal (*op. cit.*), a densidade de voçorocas nesta bacia era de 0,93 voçorocas/ha, mas a densidade também mostrou-se relacionada com as unidades geológicas, sendo o granitóide Campinho aquela que apresentou os maiores valores (1,22 voçorocas/ha).

Sobre a evolução destas voçorocas, Rocha Leão (2005) concluiu que há aumento na velocidade de incisão vertical e horizontal dessas voçorocas a partir do momento que o canal atinge o saprolito, uma vez que ele apresenta baixa coesão verdadeira, o que facilita a evolução remontante desses canais. Coelho Netto (2003) e Leal (2009), através do mapeamento da rede de fluxos subterrâneos na cabeceira de drenagem próxima a uma voçoroca, concluíram que em alguns casos os divisores de água subterrânea podem não coincidir os divisores topográficos, o que justifica um avanço significativo desses canais mesmo quando estes se aproximam dos divisores topográficos. Neste caso estudado, o canal que apresenta a maior área de contribuição superficial avança numa velocidade menor que o outro dígito que apresenta área de contribuição menor, isto porque existe a pirataria da água subterrânea do vale vizinho em direção ao dígito que cresce mais rapidamente.

Estudos de Fonseca (2006) na fazenda Três Barras, localizada na bacia do rio Bananal, demonstram alguns dos mecanismos erosivos gravitacionais que o processo de voçorocamento pode provocar nas encostas das cabeceiras de drenagem, como deslizamentos em leque e rastejos, sendo que nesta área também ocorre um paralelismo entre o eixo da voçoroca e as fraturas predominantes das rochas, assim

como a ocorrência de artesianismo. Embora estudando em sub-bacias diferentes da bacia do rio Bananal, os resultados de Fonseca (2006) e Rocha Leão (2005) apresentaram concordância no que diz respeito ao atraso dos picos de poro-pressão positiva e os picos de chuva, com um atraso médio de três meses quando comparados aos acumulados de chuva. Leal (2009), estudando na mesma área que Rocha Leão (2005), na voçoroca localizada na fazenda Bela Vista, não chegou a um único tempo de resposta dos poços e piezômetros instalados, que variaram a menos de um mês a mais de um ano de atraso. No entanto, nos três estudos foram detectados fluxos artesianos nos piezômetros instalados, especialmente naqueles colocados ao longo do eixo destas concavidades. Avelar e Coelho Netto (1992b) também detectaram artesianismo em uma concavidade suspensa na bacia do rio Bananal, sendo que foram detectados aumentos extremamente repentinos nas cargas de pressão de dois piezômetros entre o final de janeiro e início de fevereiro de 1991. Sobre esta temporalidade de resposta dos poços e piezômetros, Leal (2009) também observou um aumento das cargas de pressão geralmente nos meses de janeiro e fevereiro, sendo que a resposta mais antecipada ocorreu dezembro de 2006 e janeiro de 2007, sendo este o período com antecedente mais chuvoso dentre os anos analisados. Já os resultados de Fonseca (2006) indicaram um aumento das cargas piezométricas a partir do mês de dezembro, cerca de um mês e meio antes do apontado por Leal (2006).

Um modelo elaborado por Coelho Netto (1999) baseado em dados que apontam um aumento das concavidades estruturais de montante para jusante na bacia do rio Bananal, ressalta a importância da exfiltração da água pelas fraturas a partir de um aquífero regional. Este modelo evolutivo ressalta o gradiente hidráulico formado a partir da infiltração e percolação da água no domínio montanhoso da serra do Mar, sendo facilitado pelo mergulho das camadas geológicas de direção NW. Os resultados apontados por Coelho Netto (2003) e Leite (2006) em levantamentos realizados no domínio montanhoso da bacia do rio Fortaleza, afluente do rio Bananal, relacionam a formação de depressões fechadas e a abertura de concavidades suspensas próximas aos divisores com o processo de percolação através de fraturamentos subverticais, o que favorece a subsidência geoquímica, promovendo o rebaixamento do latossolo pré-existente e sua subsequente transformação por hidromorfia. Sendo assim, além de atuarem como vias de exfiltração de água, as fraturas também apresentam servem como vias de percolação descendente de água.

Como é possível constatar a partir dos diversos estudos apontados, as alterações climáticas e de uso e cobertura do solo alteraram significativamente a dinâmica hidro-erosiva no MVRPS por diversas vezes. A partir da década de 1940 a atividade pecuária foi acompanhada pela industrialização, assim como pela expansão dos núcleos urbanos, especialmente das grandes metrópoles de São Paulo e Rio de Janeiro. Atualmente, ao longo de grande parte do MVRPS observa-se a franca expansão de cidades com atividades econômicas diversas, dentre as quais se destaca o comércio, pesquisa, indústria de bens de consumo e duráveis, além da agroindústria relacionada ao beneficiamento da celulose extraída de plantios florestais de eucalipto. Esta atividade diferencia-se por possuir uma extensa área de influência, uma vez que existe a necessidade de aporte constante de matéria prima para as fábricas a partir de fazendas produtoras circunvizinhas. É neste contexto que os plantios de eucalipto têm sido implantados no MVRPS, para abastecer as fábricas de papel e celulose instaladas as margens do rio Paraíba do Sul.

#### 4.1.4 Características climáticas

A análise da precipitação e temperatura média mensal indica que o MVRPS apresenta dois períodos bastante contrastantes: um quente e úmido, de outubro a março, e um frio e seco, de junho a agosto (Figura 24). São marcantes também nesta região as variações que ocorrem na comparação do domínio montanhoso das serras do Mar e da Mantiqueira com o domínio colinoso do vale do rio Paraíba do Sul. Neste último, os índices pluviométricos são menores e as temperaturas mensais são maiores.

Observando a precipitação média mensal referente à análise de dezoito estações pluviométricas do MVRPS no período de 1970-1999, verifica-se que a pluviosidade média anual da região é de 1.700 mm, com maiores índices no compartimento montanhoso (1996 mm) que no colinoso (1509 mm), conforme levantado por Sato (2008). Os meses de outubro a março apresentam índices pluviométricos médios acima de 100 mm mensais e acumulados respondem por aproximadamente 80% do total anual de ambos os domínios (colinas e montanhas). Os meses mais secos são junho, julho e agosto, com médias mensais inferiores a 50 mm. A temperatura média anual é de 20,8 °C no domínio de colinas, enquanto no domínio montanhoso a temperatura média anual é de 18,2 °C. O mês mais quente é

fevereiro, com temperatura média de 23,7 °C no domínio de colinas e 21,1 °C no montanhoso, enquanto julho se caracteriza como o mês mais frio).

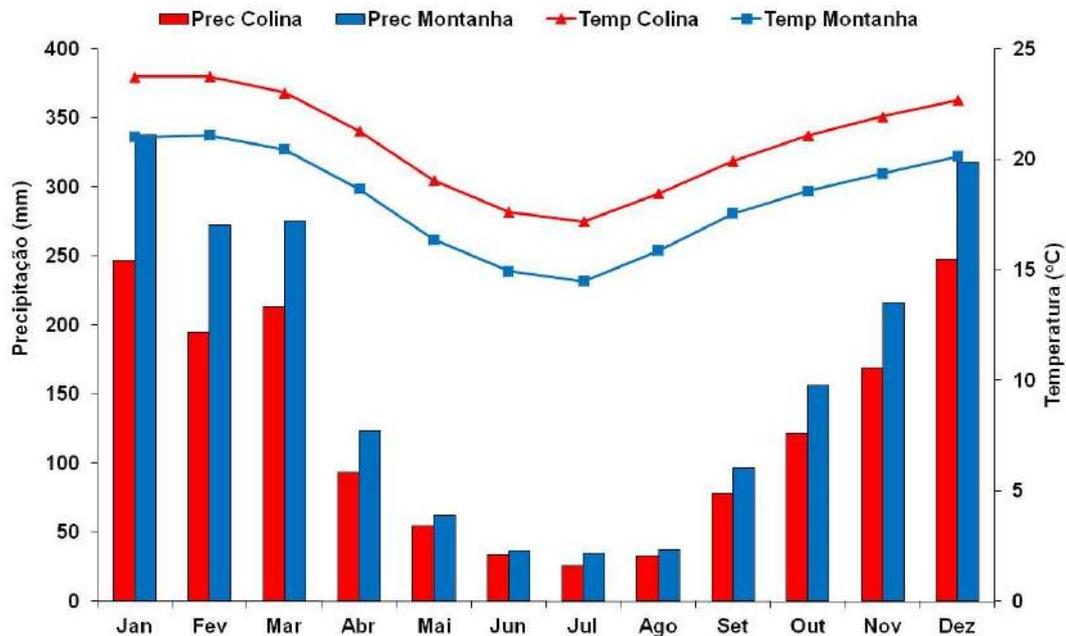


Figura 24 – Precipitação e temperatura média mensal no domínio colinoso e montanhoso do MVRPS (adaptado de SATO, 2008).

## 4.2 BACIA DO RIO SESMARIA

A bacia do rio Sesmária drena o reverso da escarpa tectônica da serra do Mar, localmente denominada serra da Bocaina, no MVRPS. Trata-se de uma bacia de fronteira entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro (Figura 25). Abrange uma área total de 149 Km<sup>2</sup> e apresenta desnivelamento topográfico de 1695 m (400 – 2095 m) e está dividida em dois compartimentos geomorfológicos: um domínio colinoso, com elevações de modo geral inferiores a 600 m, com amplitudes de relevo entre 40 e 100 m, e um domínio montanhoso, que se encontra em elevações acima de 600 m (Figura 26).

Na bacia do rio Sesmária, Dantas (no prelo) mapeou 287 concavidades estruturais abertas, 215 concavidades estruturais suspensas, 52 concavidades abertas, 19 voçorocas inativas e 5 voçorocas ativas, com total predomínio de ocorrências de todas as feições no domínio colinoso da bacia (Figura 27). Na comparação feita com o levantamento de Leal (2009) para a bacia do rio Piracema

(0,93 voçorocas/ha), verifica-se que a densidade de voçorocas na bacia do rio Sesmária é bastante inferior (0,16 voçorocas/ha).

De acordo com Vianna *et al.* (2007), a área ocupada pelos plantios de eucalipto representa 3,1% da área total da bacia, localizando-se no domínio de colinas (Figura 28). Os maiores fragmentos florestais estão concentrados no domínio montanhoso, e numerosos pequenos fragmentos ocorrem no domínio de colinas. Juntos, estes fragmentos de floresta Atlântica respondem por 31,7% da área total da bacia. A matriz da paisagem desta bacia, assim como de todo MVRPS, é composta por gramíneas destinadas à pecuária extensiva. Só na bacia do rio Sesmária estas áreas correspondem a 63,5% da área total. Áreas de ocupação urbana (1,6%) estão concentradas na porção norte da bacia e correspondem a parte da cidade de Resende/RJ. Na porção montanhosa da bacia também existem evidências de processos erosivos por ação gravitacional (movimentos de massas ou deslizamentos), que deixam o solo exposto em algumas áreas (cicatrices de deslizamentos).

Sobre a composição e estrutura geológicas (Figura 29), observa-se que na bacia do rio Sesmária predominam rochas de idade Pré-Cambriana, sendo representadas por rochas dos complexos Embu e Taquaral, além da suíte Campo Alegre, com orientação NE-SW. Rochas do Terciário são observadas na bacia sedimentar de Resende e os depósitos Quaternários são encontrados nas planícies de inundação dos rios Feio, Formoso, São João, além de áreas próximas à confluência com o rio Paraíba do Sul. Também foram mapeadas algumas falhas na porção média e baixa da bacia, incluindo uma falha normal nas proximidades da bacia sedimentar de Resende. Nos metassedimentos do Complexo Embu são apontadas uma série de dobras antiformais e sinformais (EIRADO SILVA, 2006).

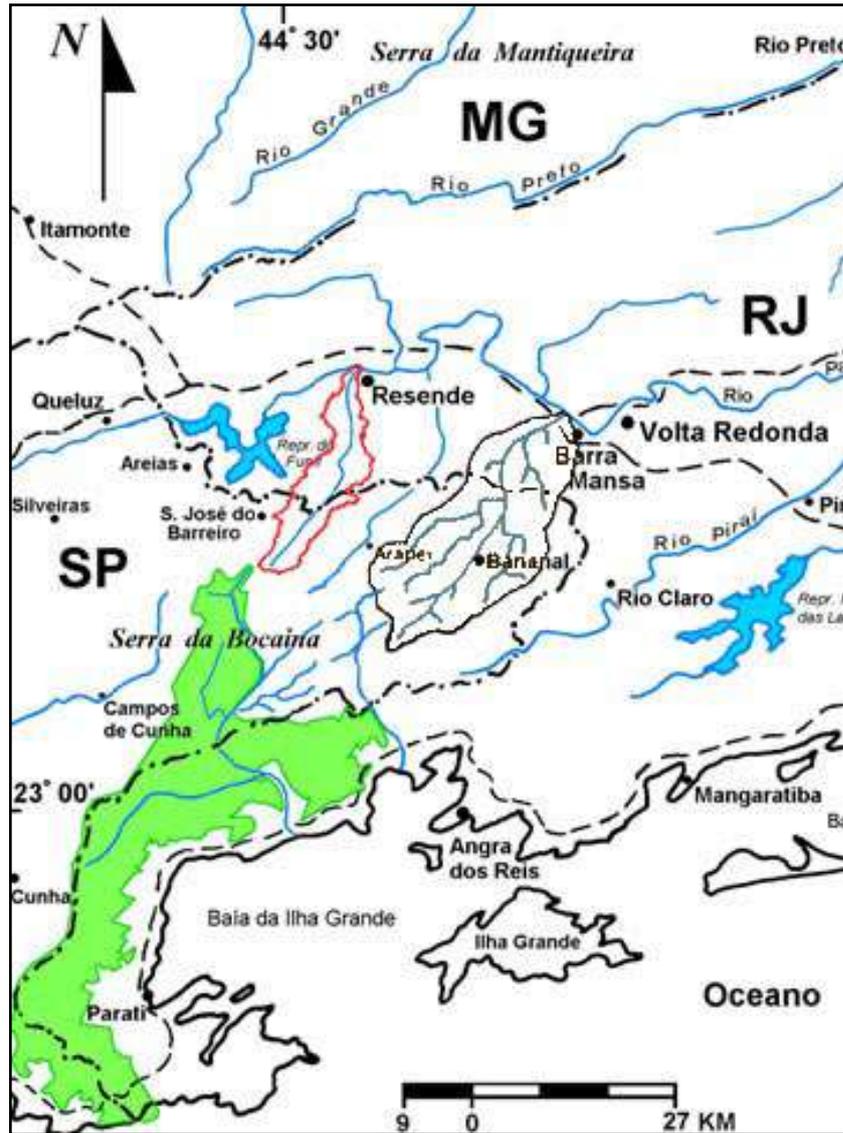


Figura 25 - Localização da bacia do rio Sesmária (destacado em vermelho), próxima à bacia do rio Bananal.

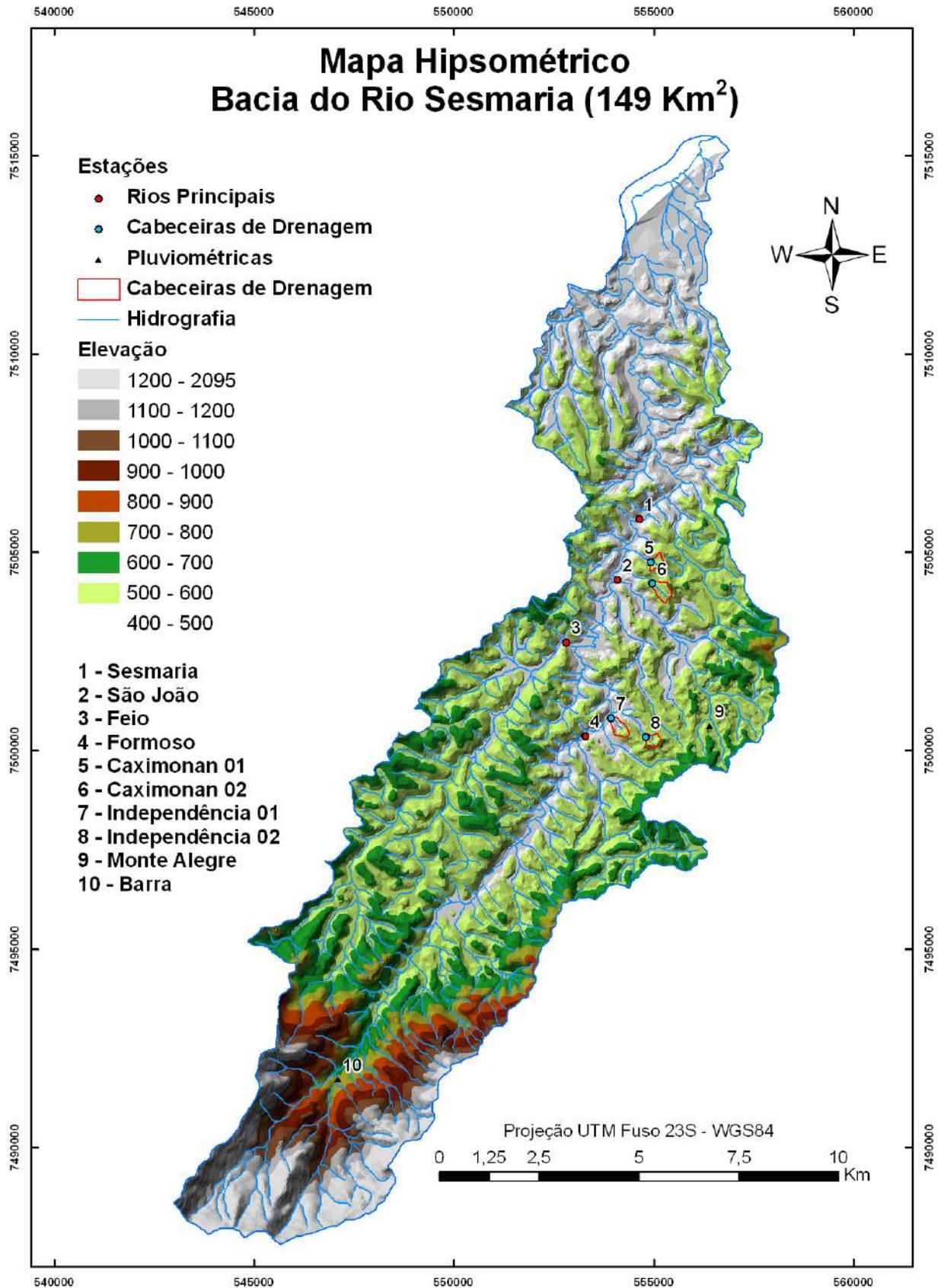


Figura 26 – Mapa hipsométrico da bacia do rio Sesmaria. A numeração indica as estações de monitoramento hidrológico.

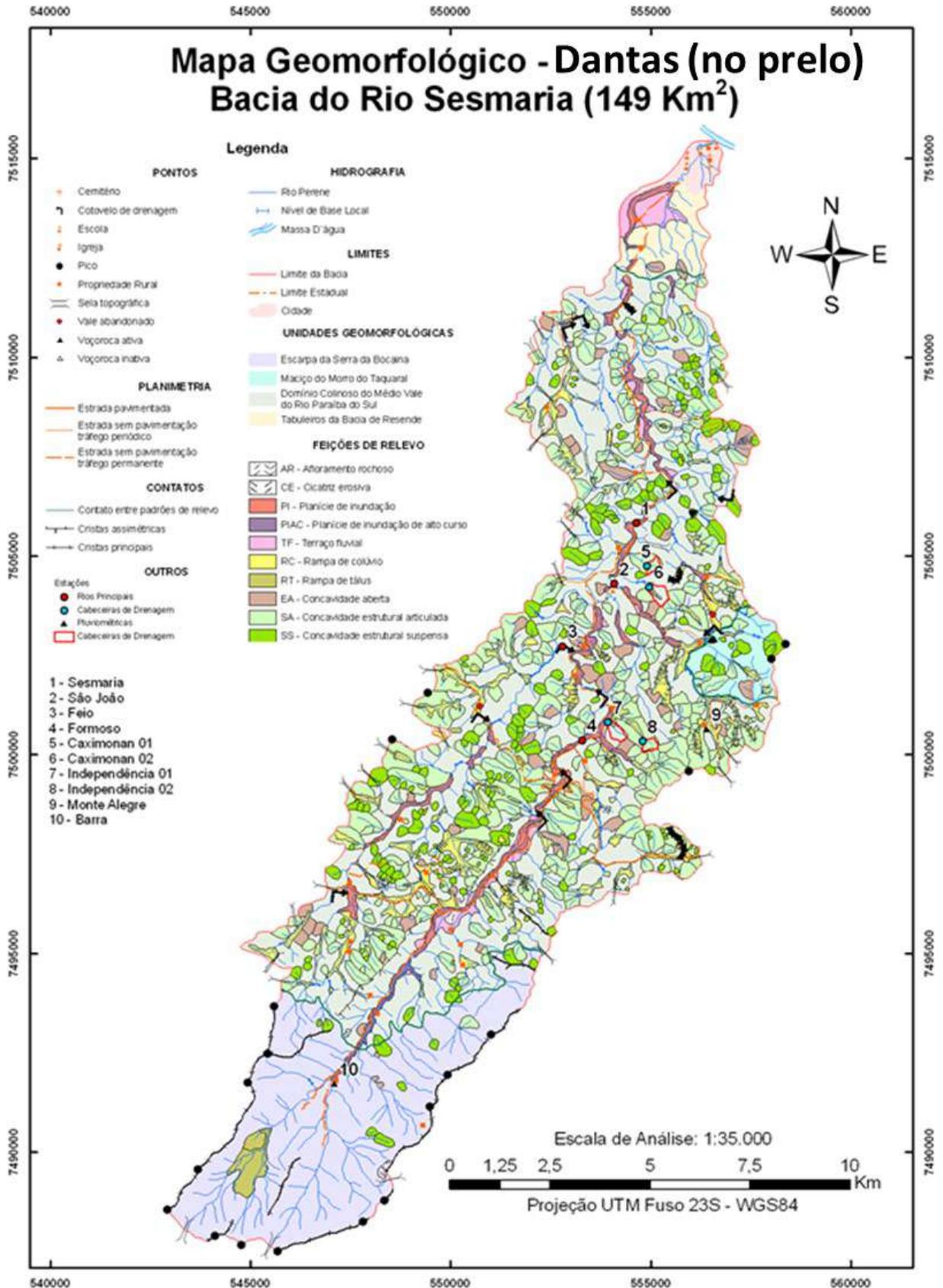


Figura 27 – Mapa geomorfológico da bacia do rio Sesmária. A numeração indica as estações de monitoramento hidrológico.

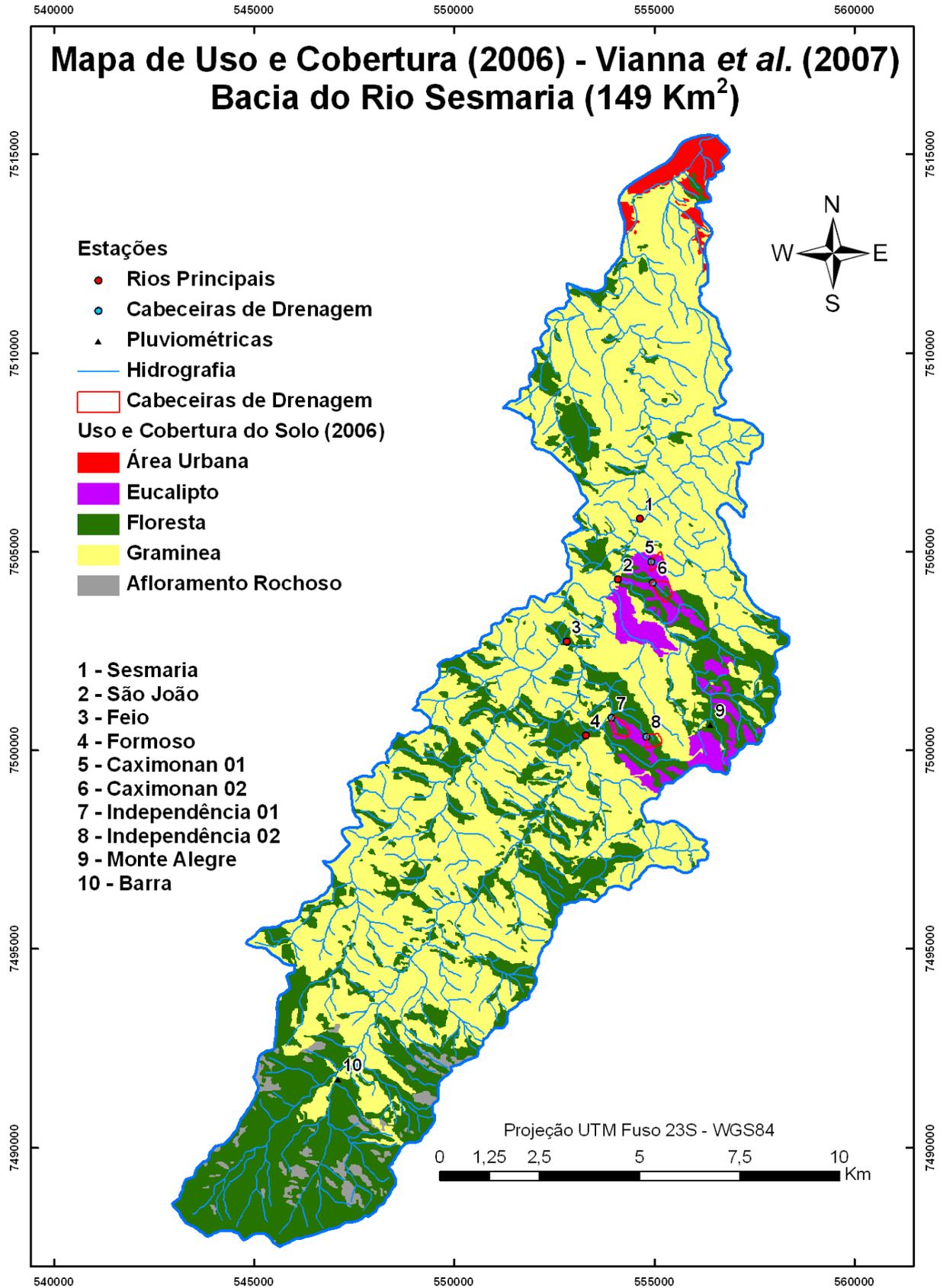


Figura 28 – Mapa de uso e cobertura do solo da bacia do rio Sesmaria. A numeração indica as estações de monitoramento hidrológico.

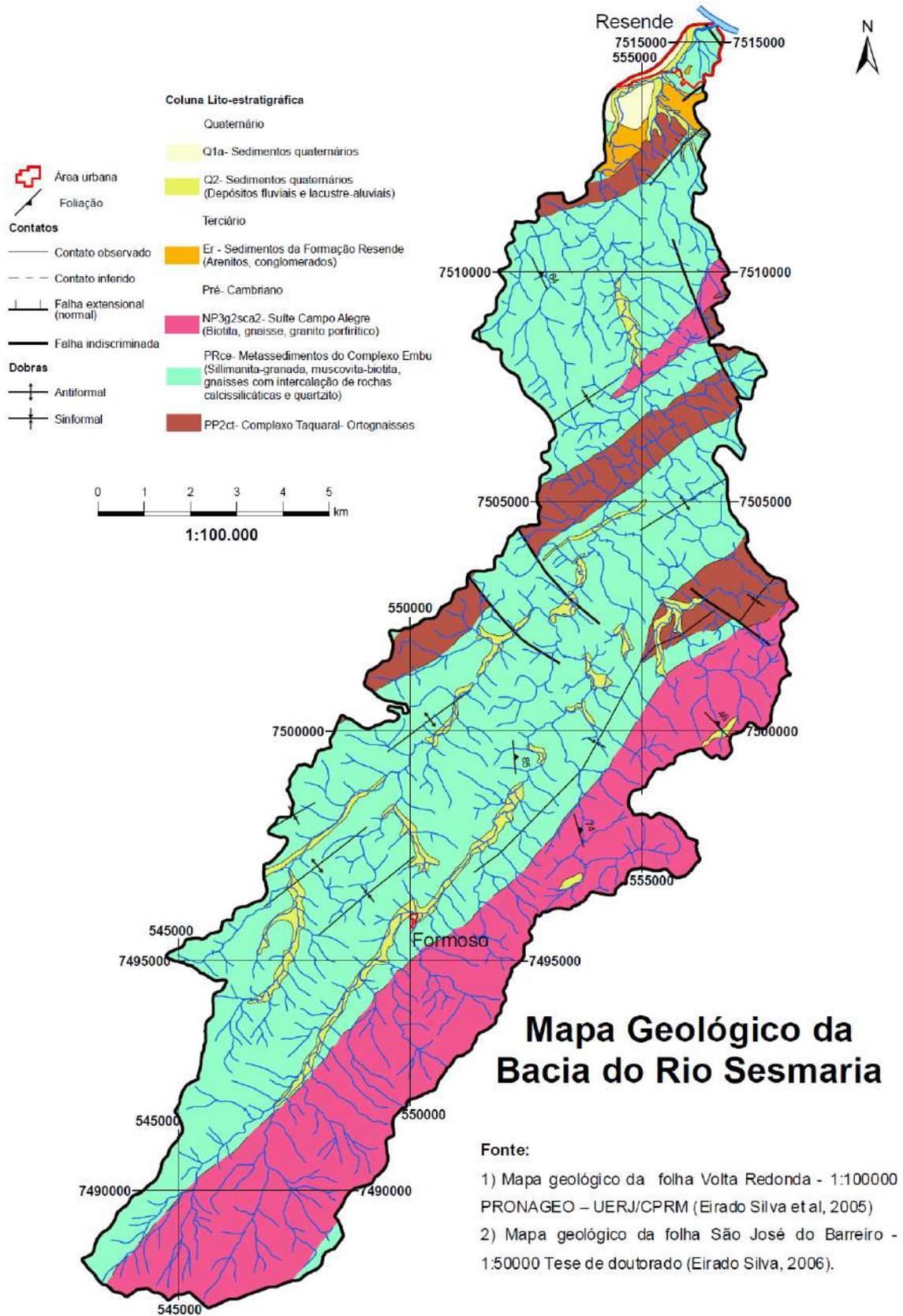


Figura 29 – Mapa geológico da bacia do rio Sesmaria.

### 4.3 CABECEIRAS DE DRENAGEM

A bacia experimental do rio Sesmaria apresenta quatro estações de monitoramento em cabeceiras de drenagem com plantios de eucalipto, sendo duas localizadas na fazenda Caximonan e outras duas na fazenda Independência, ambas da FIBRIA Celulose S.A. As fazendas Caximonan e Independência foram escolhidas por serem representativas dos plantios de eucalipto da bacia do rio Sesmaria. Buscou-se selecionar cabeceiras de drenagem o mais próximas entre si, que apresentassem substrato geológico homogêneo, de dimensões e orientação do eixo semelhantes e que ainda estivessem em locais que minimizassem os riscos de vandalismo aos equipamentos instalados em campo.

Foram selecionadas quatro cabeceiras de drenagem, pois, inicialmente, havia o objetivo de comparar diferentes manejos no que diz respeito ao espaçamento entre as árvores e a utilização de reforma ou rebrota nos talhões no pós-corte (Tabela 2). Entretanto, por questões intrínsecas à relação da empresa com o órgão ambiental do estado do RJ (INEA), o corte do plantio foi adiado e permanece sem data prevista para execução. De modo geral, os plantios de eucalipto são cortados com sete anos de idade, mas os plantios estudados já ultrapassam os oito anos de idade, estando, portanto, mais velhos que o habitual.

Tabela 2 – Tratamentos das estações nas cabeceiras de drenagem.

Estações	Data do Plantio	Espaçamento	Manejo Pós-Corte Previsto
Caximonan 01	16/02/2004	3 x 2 m	Não receberá corte (controle)
Caximonan 02	16/02/2004	3 x 1,5 m	Replântio
Independência 01	17/03/2004	3 x 2 m	Replântio
Independência 02	17/03/2004	3 x 2 m	Rebrota

Os plantios de eucalipto foram realizados em fevereiro de 2004 na fazenda Caximonan e em março de 2004 na fazenda Independência. Os plantios são clonais com indivíduos híbridos das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, o que acarreta grande homogeneidade no plantio. As árvores são plantadas através da técnica de cultivo mínimo, onde uma cova de 30 x 30 x 30 cm é aberta e um raio de cerca de 50 cm é limpo ao redor com o uso de enxada (técnica de coroamento). O espaçamento é regular e as mudas são plantadas nos divisores de drenagem e nas encostas laterais, sendo que nas zonas de fundo de vale (30 m para cada lado da

rede de drenagem) não é realizado o plantio de mudas em virtude dessas áreas serem APPs (Áreas de Preservação Permanente), apresentando, de modo geral, o desenvolvimento de uma vegetação secundária inicial.

Rotineiramente, ao longo do desenvolvimento dos plantios, são realizadas adubações, capinas químicas e combates às formigas. A adubação de base é realizada aplicando-se 110 g/planta de NPK (04:28:06) + 0,3% Cobre + 0,7% Zinco em uma coveta lateral, no lado superior do terreno, em uma distância ao redor de 15 cm da planta e a 10 cm de profundidade ou no fundo da cova de plantio sem revolver o adubo. Após esta primeira aplicação, foram realizadas adubações de cobertura entre os 2-3 meses e entre os 7-9 meses. Na 1ª adubação de cobertura (2-3 meses) foram aplicados 100 g/planta de NPK (20:00:20) + 0,3% B em coroa ou semicírculo no limite de projeção da copa, respeitando-se uma distância mínima do caule de 40 cm e uma altura mínima da planta de 70 cm. Já na 2ª adubação de cobertura a aplicação foi realizada da mesma forma, mas com aplicações de 250 Kg/ha de NPK (20:00:15) + 1,2% B. Também foi realizada a calagem do solo com dosagens de 1.200 Kg/ha. O herbicida pós-emergente utilizado foi o Scout (princípio ativo glifosato), sendo uma aplicação realizada antes do plantio e de duas a três aplicações após o plantio. Utiliza-se de 150 a 200 litros de calda/hectare, sendo que a calda tem concentração de 1,0%, ou seja, em cada aplicação, utiliza-se no máximo 2 litros de herbicida/ha. Utilizou-se também o herbicida pré-emergente Goal (princípio ativo Oxyfluorfen), porém este foi utilizado apenas na coroa da muda, uma única vez, imediatamente após o plantio. Foram aplicados em média 20 litros de calda/ha. A herbivoria das formigas saúva foi controlada com o lançamento do formicida Attamex-S (princípio ativo Sulfluramida em concentração de 0,02%), com aplicações de 0,2 a 0,4 Kg/ha.

As cabeceiras de drenagem selecionadas apresentam as seguintes características geomorfológicas (Tabela 3) e de uso e cobertura do solo (Tabela 4), além das Figuras 30 a 37.

Tabela 3 - Parâmetros geomorfológicos das cabeceiras de drenagem. P: perímetro,  $\Delta H$ : desnivelamento, Cc: comprimento de canais, G: gradiente da bacia, Dd: densidade de drenagem, Ic: índice de circularidade.

Estação	Área (ha)	P (m)	Cc (m)	Dd (m/ha)	$\Delta H$ (m)	G	IED (m/ha)	Ic (%)
Cax 01	10,7	1500	443	41,4	127	0,33	13,7	59,7
Cax 02	18,0	1712	513	28,5	107	0,17	4,8	77,2
Ind 01	14,0	1536	631	45,0	127	0,20	9,1	74,7
Ind 02	10,1	1316	197	19,5	126	0,31	6,1	73,6

Tabela 4 – Uso e cobertura do solo das cabeceiras de drenagem. FSI: floresta secundária inicial, FST: floresta secundária tardia.

Estação	Área (ha)	Eucalipto		Estradas		FSI		FST	
		(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(ha)	(ha)	(%)
Cax 01	10,7	5,4	50,1	0,5	4,3	3,3	31,3	1,5	14,3
Cax 02	18,0	12,8	70,8	0,9	4,7	4,4	24,5	0,0	0,0
Ind 01	14,0	9,8	69,6	0,8	5,9	3,4	24,5	0,0	0,0
Ind 02	10,1	7,0	68,5	0,4	4,1	2,8	27,4	0,0	0,0

Os dados dos Inventários Florestais realizados pela FIBRIA nos talhões das fazendas Caximonan e Independência foram utilizados para caracterizar os plantios das cabeceiras de drenagem (Tabela 5):

Tabela 5– Parâmetros dos plantios nas cabeceiras de drenagem. ID: idade, DAP: diâmetro à altura do peito médio (cm), H: altura média (m) H<sub>D</sub>: altura dominante (m) AB: área basal (m<sup>2</sup>/ha) IMA: incremento médio anual (m<sup>3</sup>/ha), V: volume de madeira (m<sup>3</sup>/ha).

Est.	Esp. (m)	Plantio	1º Levantamento (Cax: 10/12/08, Ind: 08/12/08)							2º Levantamento (Cax: 26/01/12, Ind: 19/01/12)						
			ID	DAP	H	H <sub>D</sub>	AB	IMA	V	ID	DAP	H	H <sub>D</sub>	AB	IMA	V
Cax 01	3x2	16/02/2004	4,82	12,1	20,7	23,9	21,2	41,8	201,6	7,95	14,1	23,1	28,2	28,9	40,4	321,2
Cax 02	3x1,5	16/02/2004	4,82	11,4	20,5	23,7	20,7	40,9	197,2	7,95	12,7	21,5	26,6	26,2	35,0	277,9
Ind 01	3x2	17/03/2004	4,73	12,9	22,6	26,1	21,4	47,0	222,4	7,85	14,8	24,0	29,4	28	40,7	319,8
Ind 02	3x2	17/03/2004	4,73	12,9	22,6	26,1	21,4	47,0	222,4	7,85	14,8	24,0	29,4	28	40,7	319,8

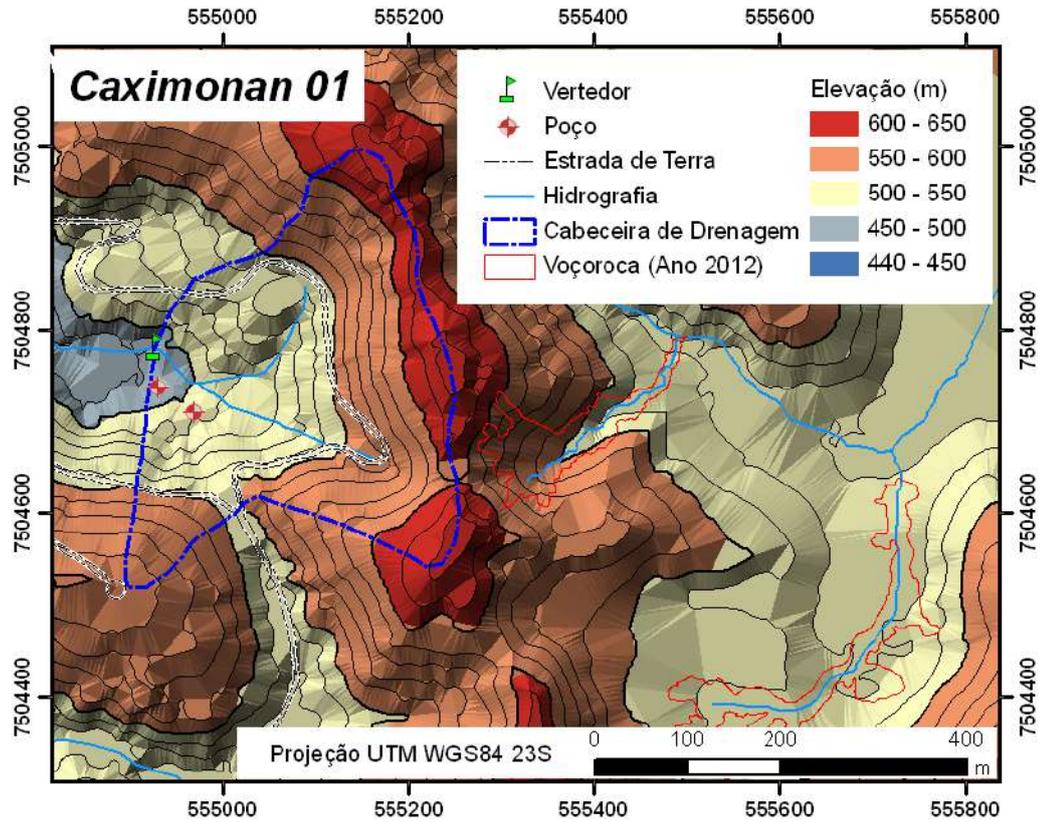


Figura 30 – Mapa hipsométrico da cabeceira de drenagem Caximonan 01.

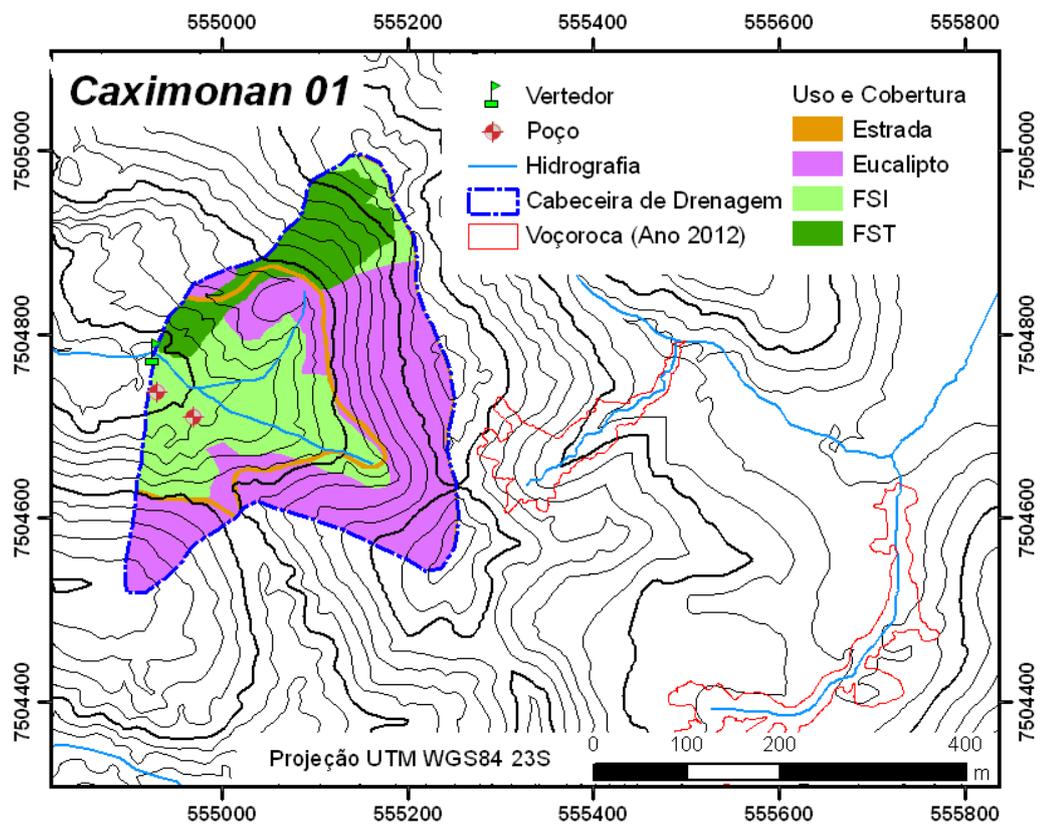


Figura 31 – Mapa de uso e cobertura da cabeceira de drenagem Caximonan 01. FSI: floresta secundária inicial, FST: floresta secundária tardia.

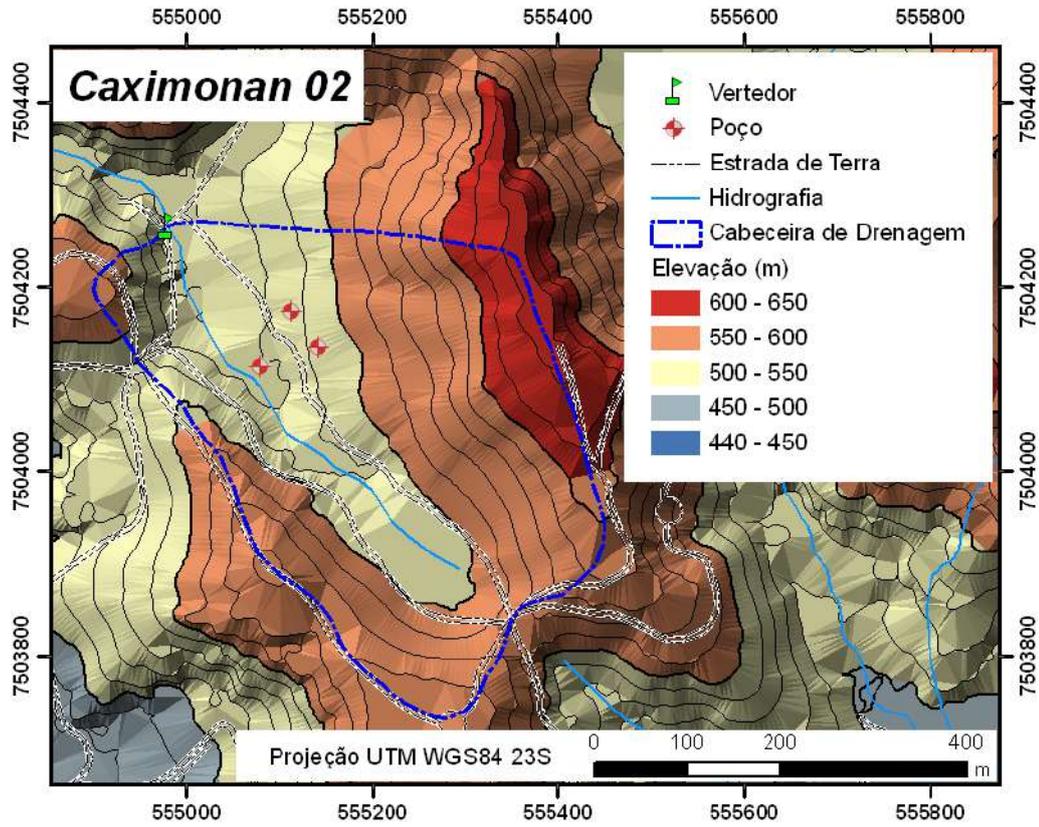


Figura 32 – Mapa hipsométrico da cabeceira de drenagem Caximonan 02.

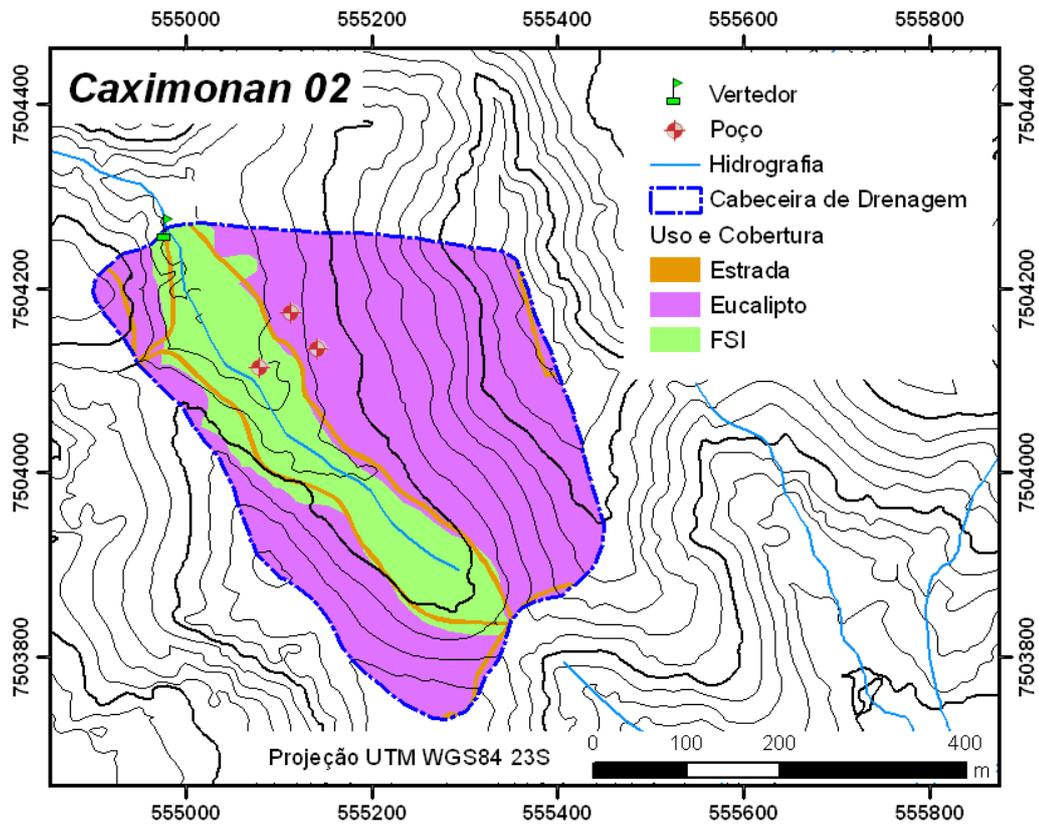


Figura 33 – Mapa de uso e cobertura da cabeceira de drenagem Caximonan 02. FSI: floresta secundária inicial.

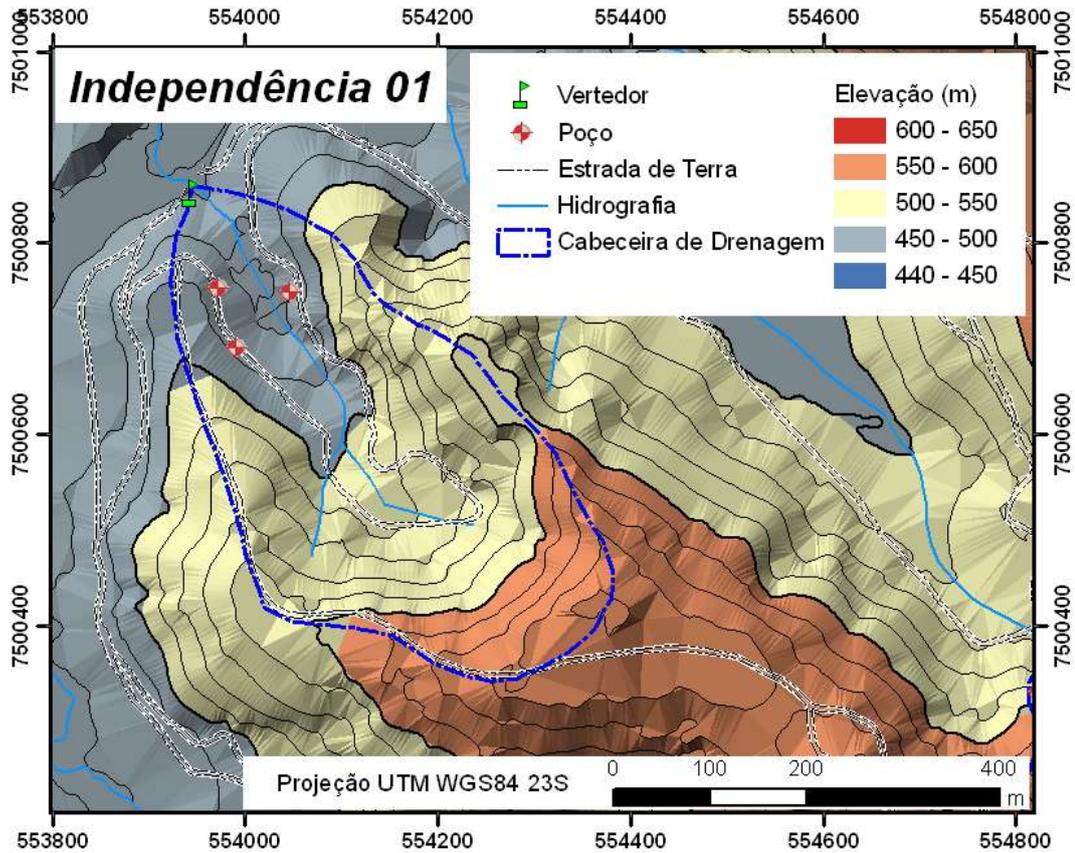


Figura 34 – Mapa hipsométrico da cabeceira de drenagem Independência 01.

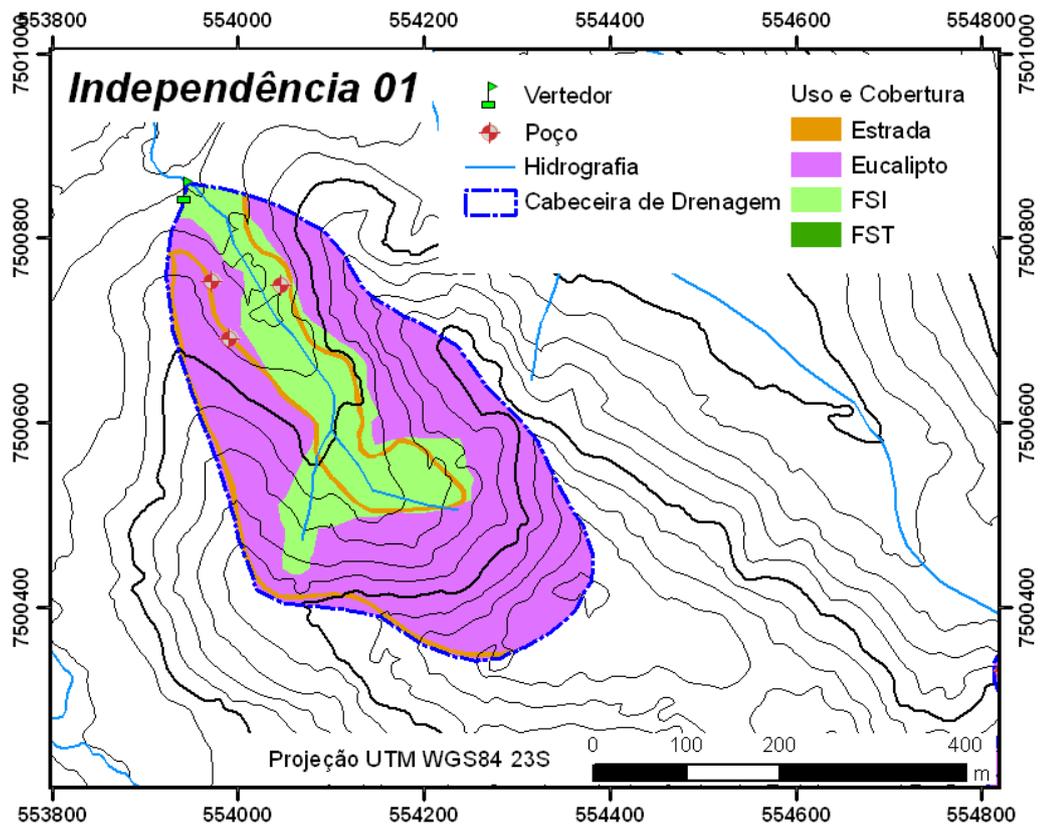


Figura 35 – Mapa de uso e cobertura da cabeceira de drenagem Independência 01. FSI: floresta secundária inicial.

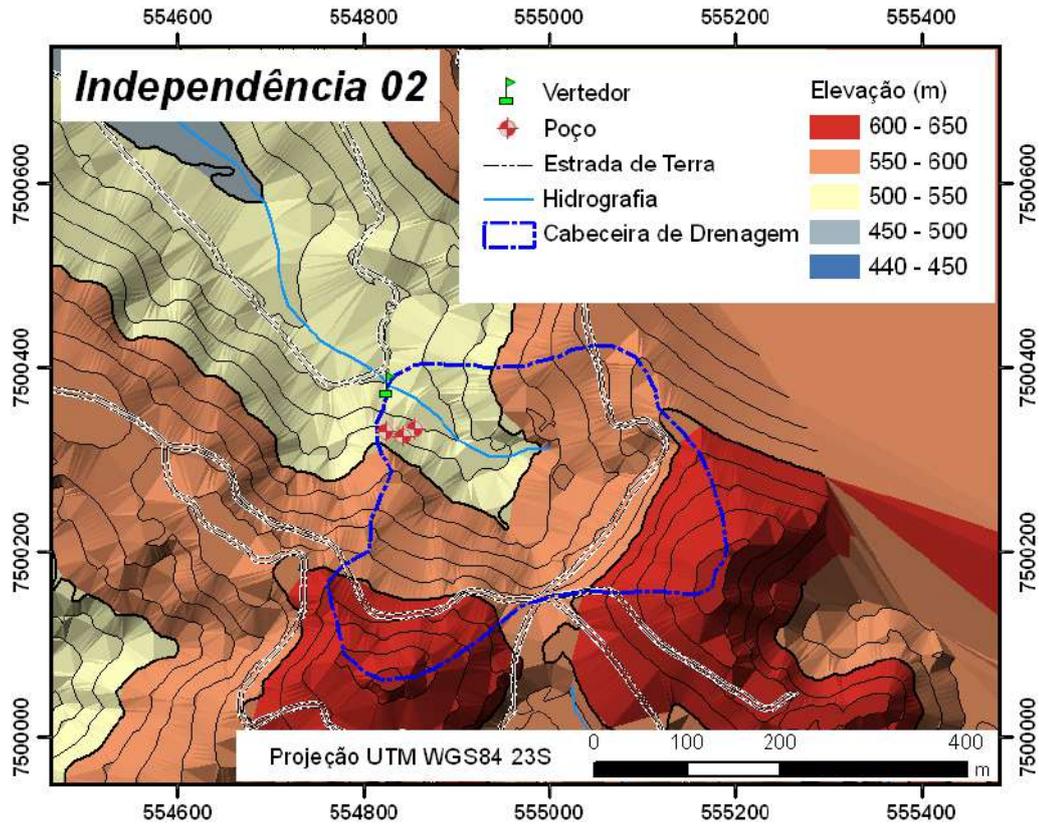


Figura 36 – Mapa hipsométrico da cabeceira de drenagem Independência 02.

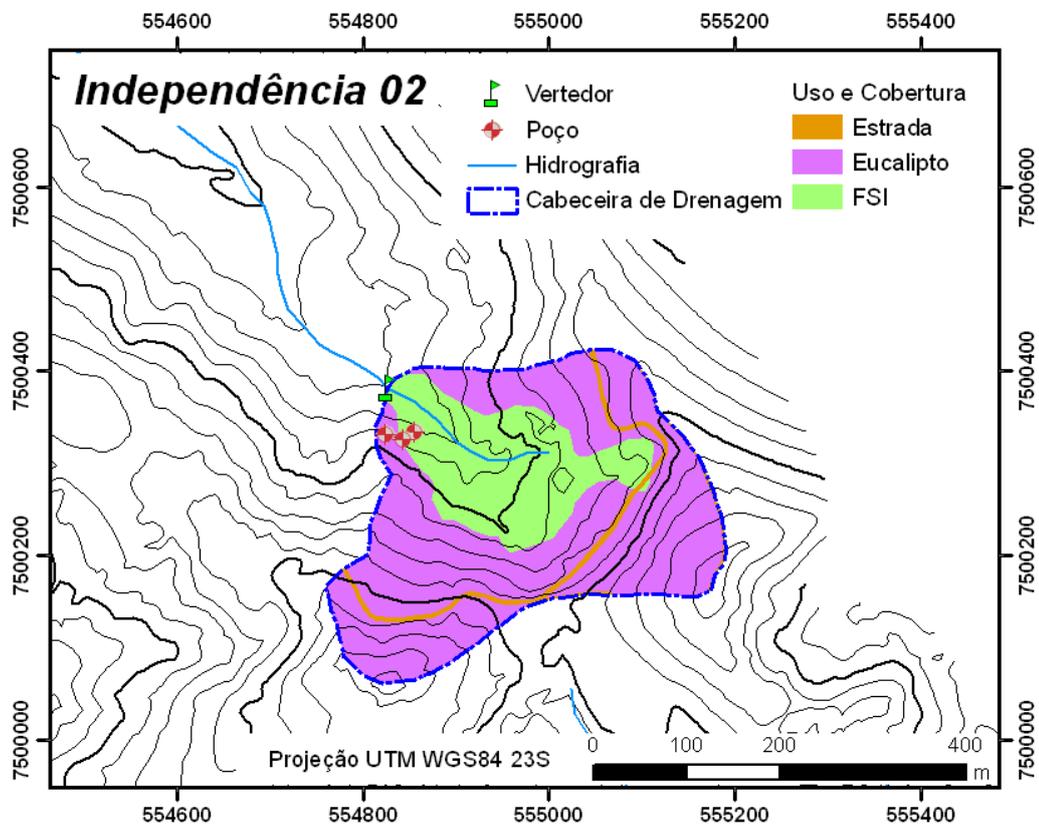


Figura 37 – Mapa de uso e cobertura da cabeceira de drenagem independência 02. FSI: floresta secundária inicial.

## 5 METODOLOGIA

No presente estudo a metodologia integrou diversas técnicas de hidrometria e geoprocessamento apoiadas em observações de campo através de uma rede de estações de monitoramento distribuída em um arranjo espacial especialmente desenhado para atingir os objetivos propostos. A seguir estão descritas as metodologias utilizadas no estudo.

### 5.1 REDE DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO

Conforme representado nas figuras 26, 28, 30 a 37, na bacia experimental do rio Sesmaria foram instaladas um total de dez estações de monitoramento, conforme descrito a seguir: quatro estações de monitoramento em cabeceiras de drenagem com plantios de eucalipto com vertedores para o monitoramento da cota linimétrica e vazão das águas de eflúvio, sendo que duas dessas estações (Caximonan 02 e Independência 02) também monitoraram a chuva de forma automatizada. Em todas as quatro cabeceiras de drenagem foram instalados poços de monitoramento da água subterrânea; outras quatro estações de monitoramento estão localizadas nos principais rios da bacia e monitoram a cota linimétrica e a vazão dos rios, além da precipitação de forma manual; e por fim, outras duas estações (Monte Alegre e Barra) que apresentaram medições de precipitação de forma manual (Tabela 6).

Tabela 6 – Parâmetros mensurados nas estações de monitoramento. RP: Rios Principais CD: Cabeceiras de Drenagem

#	Estações	Domínio	Precipitação		Cota/Vazão	Nível D'água
			Auto	Manual		
1	Sesmaria	RP		X	X	
2	São João	RP		X	X	
3	Feio	RP		X	X	
4	Formoso	RP		X	X	
5	Caximonan 01	CD			X	X
6	Caximonan 02	CD	X		X	X
7	Independência 01	CD			X	X
8	Independência 02	CD	X		X	X
9	Monte Alegre	Colina		X		
10	Barra	Montanha		X		

Com a implantação das quatro estações de monitoramento em cabeceiras de drenagem almeja-se comparar as alterações hidrológicas e erosivas de plantios de eucalipto com diferentes espaçamentos. As quatro estações dos rios principais da

bacia do rio Sesmaria foram instaladas em pontos onde torna-se possível avaliar as condições quanti- e qualitativas da água nos canais coletores antes e depois de receberem os afluentes que proveem das áreas com plantios de eucalipto. As estações dos rios Feio e Formoso avaliam as condições hidrológicas antes da área de influência dos plantios de eucalipto, enquanto a estação do rio São João é o ponto de monitoramento que recebe maior influência desses plantios. Já a estação do rio Sesmaria monitora os parâmetros no principal rio da bacia e encontra-se a jusante das demais estações, permitindo avaliar as condições quanti- e qualitativas da água do canal principal após a influência dos plantios de eucalipto (Figura 28).

## 5.2 PRECIPITAÇÃO

A precipitação foi mensurada em quatro pontos nas estações dos rios principais (Feio, Formoso, São João, Sesmaria), em dois pontos nas estações das cabeceiras de drenagem (Caximonan 02 e Independência 02), além de um ponto na fazenda Monte Alegre e outro ponto, mais isolado, na porção montanhosa da bacia (Figura 26), totalizando oito pontos de medição. Os dados de chuva da estação Formoso (Código ANA 02244152), localizada na localidade de mesmo nome, não foram inseridos na análise por apresentar valores discrepantes em relação às demais estações (SATO *et al.*, 2011). A implantação de um ponto de monitoramento de chuvas no domínio montanhoso desta bacia foi realizada em virtude de terem sido apontadas diferenças significativas na pluviosidade média anual entre as estações localizadas no domínio das colinas e no domínio montanhoso.

Nas estações Sesmaria, São João, Feio, Formoso e Monte Alegre as medidas da precipitação foram realizadas com a utilização de três pluviômetros artesanais como réplicas, sendo a média aritmética destes instrumentos utilizada como valor de referência da precipitação diária. Os pluviômetros artesanais foram feitos com tubos de PVC de 100 mm de diâmetro e colocados sobre suportes de madeira, sendo a precisão e a acurácia destes pluviômetros avaliadas por Sato (2008) e Sato *et al.* (2011). Na estação Barra, utilizou-se apenas um pluviômetro do tipo Ville de Paris, enquanto nas estações Caximonan 02 e Independência 02 foram utilizados pluviômetros digitais, sendo estes dados automáticos cruzados com a análise de hidrogramas nas cabeceiras de drenagem. A aquisição de dados dos pluviômetros digitais é realizada com intervalos de cinco minutos, enquanto demais pluviômetros

foram feitas leituras diárias às 07:00 h. Os detalhes da medição da precipitação em cada estação são descritos na

Tabela 7).

Tabela 7 – Informações sobre as estações de medição de precipitação. RP: rios principais, CD: cabeceiras de drenagem.

#	Estações	Domínio	Equipamento (N)	Início da Medição	Intervalo
1	Sesmaria	RP	Manual - Artesanal (3)	Nov/08	Diário
2	São João	RP	Manual - Artesanal (3)	Nov/08	Diário
3	Feio	RP	Manual - Artesanal (3)	Nov/08	Diário
4	Formoso	RP	Manual - Artesanal (3)	Nov/08	Diário
5	Caximonan 01	CD	-	-	-
6	Caximonan 02	CD	Digital – Báscula (1)	Set/09	5 min.
7	Independência 01	CD	-	-	-
8	Independência 02	CD	Digital – Báscula (1)	Set/09	5 min.
9	Monte Alegre	Colina	Manual - Artesanal (3)	Out/06	Diário
10	Barra	Montanha	Manual -Ville de Paris (1)	Jun/09	Diário

### 5.3 COTAS LINIMÉTRICAS E VAZÃO

As vazões foram mensuradas nas cabeceiras de drenagem com o uso de vertedores triangulares de 90° de crista delgada (Figura 38) associados a régua linimétrica e sensores de nível hidrostático com compensação atmosférica (Sitron LH480 – faixa de 0 - 1 m.c.a.) conectados a dataloggers com aquisição em intervalos de cinco minutos (Figura 39). O nivelamento da régua em relação ao vértice dos vertedores foi feito com a utilização de teodolito.

Com o uso da Equação (1) desenvolvida para vertedores triangulares de 90° foi feita a conversão de carga hidráulica<sup>10</sup> (H) para vazão (Q):

$$Q = 1,4H^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão (m<sup>3</sup>/s)

H = carga hidráulica (m)

<sup>10</sup> Carga hidráulica: Altura atingida pela massa líquida, a contar da cota da soleira do vertedor retangular ou do vértice do vertedor triangular (CPRH, 2004).



Figura 38 – Vertedor triangular de 90° instalado na estação Caximonan 01.



Figura 39 – Estação Caximonan 02. Esq.: cercado para proteção dos equipamentos (painel solar, pluviômetro, caixa estanque, dataloggers e sensores) ao lado do canal com visualização da régua linimétrica. Dir.: detalhe do sistema de aquisição de dados alimentado por bateria no interior da caixa estanque.

Nas estações localizadas nos rios principais da bacia do rio Sesmaria (Feio, Formoso, São João e Sesmaria – veja Figura 27) optou-se por estimar a vazão dos rios através da curva-chave (cota x vazão). Inicialmente foram instaladas seções de régua linimétrica com o auxílio de técnicos da CPRM (Serviço Geológico do Brasil), sendo a primeira régua de cada seção enterrada parcialmente nos sedimentos de fundo dos canais de drenagem, evitando assim que fossem obtidas cotas negativas caso ocorresse o rebaixamento do fundo do canal. A partir da primeira régua foram

instaladas as demais com o auxílio do teodolito para o nivelamento de precisão. Em todas as estações dos rios principais também foram instalados RNs (referências de nível), visando a recomposição das seções de régua caso alguma régua fosse removida pelos fluxos dos rios ou por eventos de vandalismo (Figura 40). As cotas linimétricas são obtidas tanto por processo manual (anotações pelo leitor de campo), sendo cada estação visitada duas vezes por dia (07:00 h e 17:00 h no horário local). A partir do mês de março de 2012 a frequência de leituras das régua teve que ser reduzida em virtude da diminuição do aporte de recursos financeiros para pesquisa, passando a ser feita apenas uma vez por dia nas quartas-feiras, nos dias chuvosos nos dois dias consecutivos após as chuvas, visando detalhar o retorno ao fluxo de base dos canais de drenagem.



Figura 40 – Construção de seção de régua linimétrica. Esq.: nivelamento topográfico da seção de régua. Dir.: detalhe do RN (referência de nível).

Por algumas vezes a série histórica do monitoramento apresentou ausência de dados em função da destruição das seções de régua por enxurradas ou por impossibilidade de leitura das régua pelo leitor de campo. A destruição das régua acarretou ausências de dados muito mais extensas, sendo raras as vezes em que o leitor de campo esteve impossibilitado de realizar as leituras. Buscou-se recuperar as seções de régua destruídas o mais rápido possível, mas este reparo dependia de fatores como a disponibilidade dos técnicos e disponibilidade financeira. A Tabela 8 indica como estava originalmente a série histórica das estações, sendo classificadas como Completa (C) os meses em que ocorreram menos de quatro dias com falhas, Parcial (P) os meses com mais de quatro dias e menos de 15 dias com falhas e Incompleta (I) os meses com mais de 15 dias com ausência de dados.

Tabela 8 – Classificação da série histórica das estações nos rios principais. SM: Sesmaria, SJ: São João, FM: Formoso, FE: Feio, C: completa, P: parcial, I: incompleta.

Mês	2008				2009				2010				2011				2012			
	SM	SJ	FM	FE	S M	S J	F M	F E												
J	-	-	-	-	P	C	C	C	I	P	C	C	I	C	C	I	C	C	C	C
F	-	-	-	-	P	C	C	C	I	I	C	C	I	C	C	I	C	C	C	C
M	-	-	-	-	P	C	C	C	I	I	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
A	-	-	-	-	C	C	C	C	I	I	C	I	C	C	C	C	-	-	-	-
M	-	-	-	-	C	C	C	C	I	I	C	I	C	C	C	C	-	-	-	-
J	-	-	-	-	C	C	C	C	P	P	C	P	C	C	C	C	-	-	-	-
J	P	P	P	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-
A	C	C	C	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-
S	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-
O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-
N	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	P	C	C	C	C	-	-	-	-
D	C	C	C	C	P	C	C	C	P	C	C	I	C	C	C	C	-	-	-	-

Visando preencher as falhas existentes na série temporal das estações, realizou-se a correlação das cotas linimétricas das estações par a par e a partir da observação dos coeficientes de correlação linear ( $R^2$ ). Arbitrou-se utilizar os coeficientes angulares e os valores de intercepto do eixo y das correlações que apresentaram valores de  $R^2$  superiores a 50%.

A estação fluviométrica Formoso apresentou a série histórica mais completa e maior correlação com as estações Sesmaria ( $SM = 0,419*FM + 0,688$ ;  $R^2 = 0,57$ ) e São João ( $SJ = 0,346*FM + 0,393$ ;  $R^2 = 0,57$ ). Esta estação apresentou baixa correlação com a estação Feio ( $R^2 = 0,12$ ), sendo que esta última apresentou baixo coeficiente de correlação com todas as demais estações, por isso ela não teve as suas falhas preenchidas pela correlação. Após o preenchimento das falhas com os dados provenientes das funções lineares derivadas da correlação, a série temporal ficou conforme demonstrado na

Tabela 9.

Tabela 9 – Situação da série histórica das estações nos rios principais após as correlações. SM: Sesmaria, SJ: São João, FM: Formoso, FE: Feio, C: completa, P: parcial, I: incompleta.

Mês	2008				2009				2010				2011				2012			
	SM	SJ	FM	FE	S M	S J	F M	F E												
J	-	-	-	-	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	I	C	C	C	C
F	-	-	-	-	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	I	C	C	C	C
M	-	-	-	-	C	C	C	C	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
A	-	-	-	-	C	C	C	C	C	C	C	I	C	C	C	C	-	-	-	-
M	-	-	-	-	C	C	C	C	C	C	C	I	C	C	C	C	-	-	-	-
J	-	-	-	-	C	C	C	C	C	C	C	P	C	C	C	C	-	-	-	-
J	P	P	P	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-
A	C	C	C	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-
S	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-
O	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-
N	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	P	C	C	C	C	-	-	-	-
D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	I	C	C	C	C	-	-	-	-

Os dados referentes às cotas linimétricas lidas a partir das régua foram normalizados visando facilitar a comparação das diferentes estações. A normalização dos dados das cotas foi realizada seguindo a Equação (2):

$$\widetilde{CT}_{i,j} = \frac{CT_{i,j} - \overline{CT}_i}{DP_i} \quad (2)$$

Onde:

$\widetilde{CT}_{i,j}$ = Cota normalizada da estação *i* na leitura *j*

$CT_{i,j}$ = Cota da estação *i* na leitura *j*

$\overline{CT}_i$ = Cota média do conjunto de dados da estação *i*

$DP_i$ = Desvio padrão da cota do conjunto de dados da estação *i*

As mensurações de vazão foram realizadas em todas as estações dos rios principais através de medições a vau com a utilização de micromolinete (Global Water – modelo FP201) (Figura 41). Em cada seção transversal do rio foram elaboradas no mínimo dez verticais, com distâncias variáveis entre elas dependendo do comprimento da seção. Em locais onde foram observadas alterações expressivas no fundo do canal, optou-se por detalhar as verticais, diminuindo a distância entre elas. As medidas de velocidade foram obtidas em apenas um ponto (60% da profundidade da vertical) quando a profundidade era ≤ 60 cm e em dois pontos (20% e 80% da profundidade da vertical) quando a profundidade era > 60 cm. Nas verticais com profundidade

superior a 60 cm nas quais foram observadas diferenças superiores a 2 vezes nos valores da velocidade média entre os dois pontos medidos (20% e 80% da profundidade da vertical), optou-se por realizar uma terceira medida, desta vez a 50% da profundidade. Nestes dois últimos casos (2 ou 3 medidas), foi calculada a média aritmética entre os valores para compor a velocidade média da vertical. No caso das verticais onde foi realizada apenas uma medição, o valor da velocidade a 60% da profundidade foi assumido como a velocidade média da vertical.



Figura 41 – Medição da vazão a vau com utilização de micromolinete na estação rio São João.

O cálculo da vazão foi realizado segundo o método da meia seção, sendo este o método mais comumente utilizado para o cálculo de vazões em seção transversais de rios (Santos *et al.*, 2001). Por este método as vazões são calculadas multiplicando-se a velocidade média na vertical pela profundidade na vertical multiplicada pela soma das semi-distâncias às das verticais adjacentes (Figura 42). As cotas linimétricas visualizadas nos diferentes momentos de medição da vazão foram anotadas para estabelecer uma relação entre estas variáveis. Através da correlação destas variáveis foi possível definir uma curva-chave específica para cada estação dos rios principais. A relação cota-descarga de uma seção permite calcular a descarga que corresponde a uma dada altura de água, considerando-se a curva-chave uma função não linear unívoca entre nível e vazão, sendo adotadas as equações definidas por Abdalad (2011), definidas em parceria com o presente estudo.

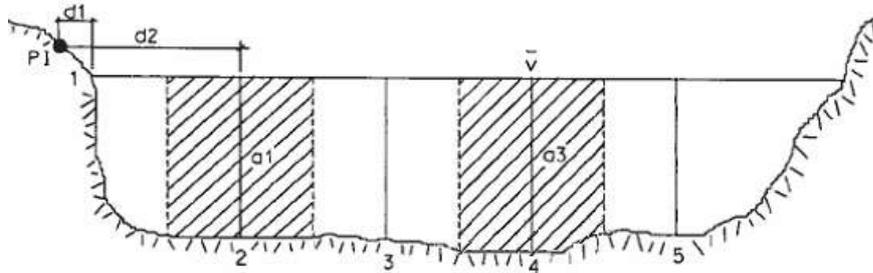


Figura 42 – Esquema de cálculo da seção média (extraído de Santos *et al.*, 2001).

#### 5.4 OSCILAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO

A variação do lençol freático foi monitorada semanalmente em 11 poços instalados nas quatro estações de cabeceira de drenagem: Caximonan 01 (P4 e P5), Caximonan 02 (P1, P2 e P3), Independência 01 (P7, P8 e P9) e Independência 02 (P10, P11, P12). Os poços foram perfurados com trado mecânico até aproximadamente 3 metros abaixo do nível d'água (NA) ou até a profundidade que as condições técnicas e de segurança permitissem. No fundo dos furos foi inicialmente depositada uma camada de areia lavada de aproximadamente 30 cm, sendo posteriormente inserido um tubo de PVC de 4" perfurado ao longo de sua extensão e envolto por uma "tela de mosquiteiro" enrolada por diversas vezes no mesmo ponto a fim de reduzir a entrada de solo no interior dos tubos. Após a colocação dos tubos, o espaço entre o tubo e a parede do furo foi preenchida por areia lavada até aproximadamente 30 cm da superfície, a partir de onde o espaço restante foi preenchido com material selante (Figuras 43 e 44). Foram coletadas amostras de solo dos três primeiros metros e partir desta profundidade outras amostras foram coletadas em intervalos de meio metro para caracterização granulométrica segundo o método de dispersão total da EMBRAPA (1997).

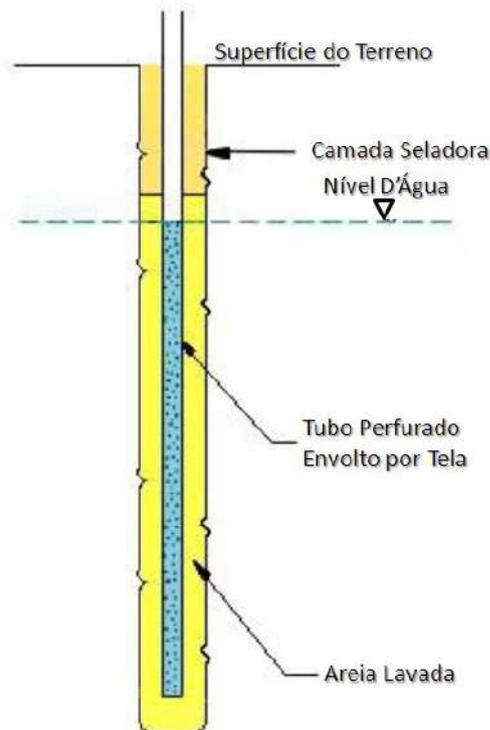


Figura 43 – Desenho esquemático dos poços de monitoramento.



Figura 44 – Poço de monitoramento (P2) na estação Caximonan 02.

Em cada cabeceira de drenagem com plantio de eucalipto buscou-se instalar um poço dentro da área de APP, próximo ao canal de drenagem, enquanto os demais poços foram instalados no interior ou próximo aos plantios de eucalipto, visando monitorar a oscilação do lençol freático nos fundos de vale como também na baixa-média encosta. As características dos poços estão descritas na Tabela 10 e a

localização dos mesmos está representada na Figura 45. Os poços na estação Ind 02 foram instalados mais tardiamente em razão de restrições financeiras para a realização das campanhas de campo.

Tabela 10 – Informações sobre os poços de monitoramento. FS: fundo de vale, BME: baixa-média encosta, H: elevação do poço.

#	Estação	Posição	Prof. (m)	Cobertura Vegetal	Instalação	H (m)
P1	Cax 02	FV	8,8	Arbóreo Denso	24/09/2009	527,746
P2	Cax 02	BME	19,0	Eucalipto	26/09/2009	538,870
P3	Cax 02	BME	17,5	Eucalipto	27/09/2009	544,203
P4	Cax 01	FV	5,8	Gramínea	01/10/2009	494,820
P5	Cax 01	BME	12,0	Gramínea	03/10/2009	510,033
P7	Ind 01	FV	4,5	Arbóreo Rarefeito	04/10/2009	480,488
P8	Ind 01	BME	14,5	Eucalipto	05/10/2009	485,460
P9	Ind 01	BME	14,8	Eucalipto	07/10/2009	487,103
P10	Ind 02	FV	6,5	Gramínea	19/11/2010	525,785
P11	Ind 02	BME	16,2	Eucalipto	23/11/2010	536,081
P12	Ind 02	BME	18,2	Eucalipto	21/11/2010	542,459

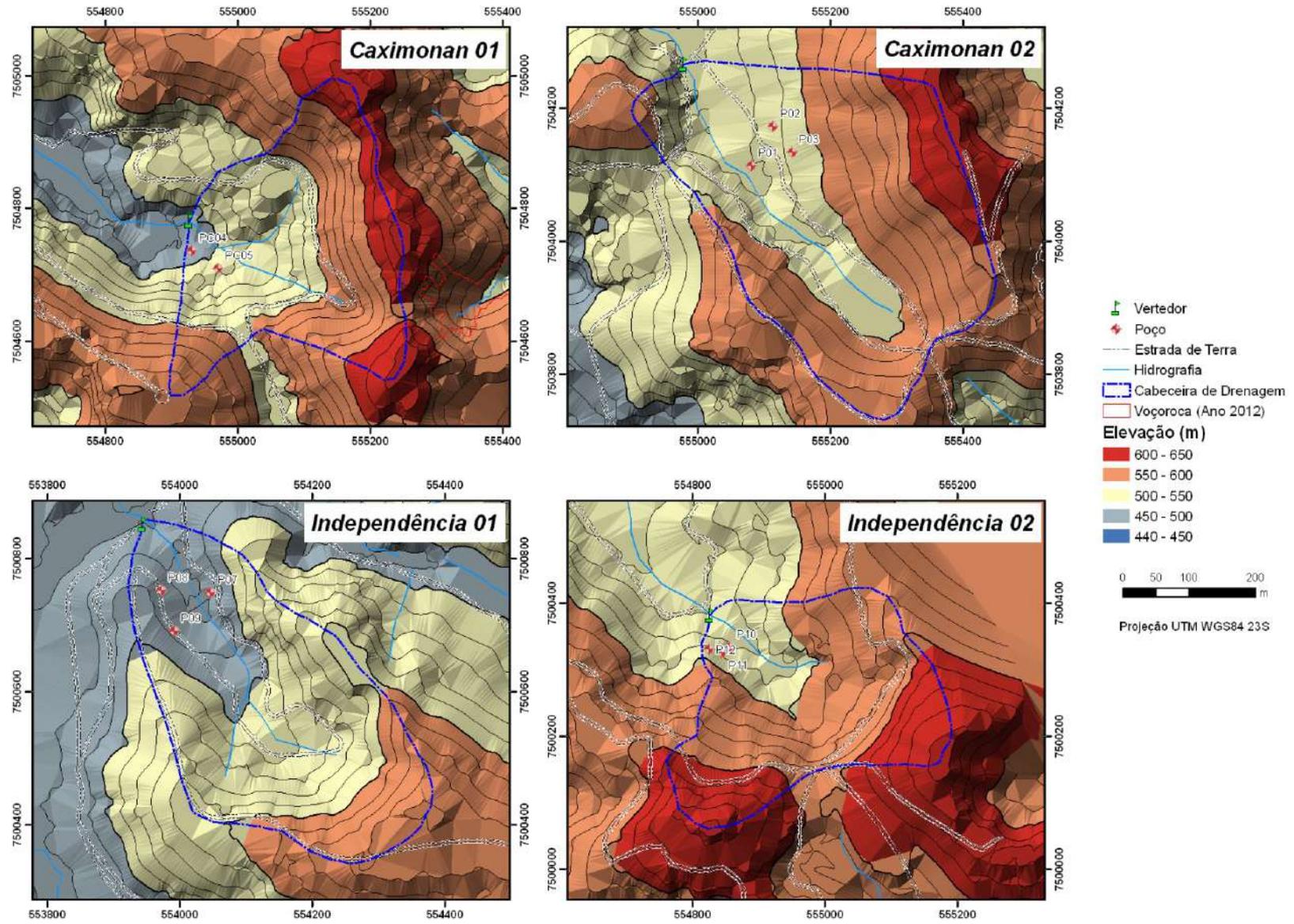


Figura 45 – Localização dos poços de monitoramento.

A leitura da profundidade do NA foi realizada semanalmente pelo operador de campo com a utilização de sensor manual. Os dados do NA foram trabalhados como profundidade em relação à superfície, como elevação (a partir dos dados de elevação geoidal apontados anteriormente) e também foram normalizados visando permitir uma comparação das respostas de recarga e depleção entre os diferentes poços. A normalização dos dados de NA foi realizada seguindo a Equação (3):

$$\widetilde{NA}_{i,j} = \frac{NA_{i,j} - \overline{NA}_i}{DP_i} \quad (3)$$

Onde:

$\widetilde{NA}_{i,j}$  = Profundidade do NA normalizado do poço  $i$  no dia  $j$  [m]

$NA_{i,j}$  = Profundidade do NA do poço  $i$  no dia  $j$  [m]

$\overline{NA}_i$  = Profundidade média do NA do conjunto de dados do poço  $i$  [m]

$DP_i$  = Desvio padrão da profundidade do NA do conjunto de dados do poço  $i$  [m]

Para relacionar o NA dos poços com as cotas de fluxo de base dos rios, fez-se necessário identificar dentre o conjunto de dados referente as cotas linimétricas das estações dos rios principais os valores que representassem o fluxo de base dos canais. Para isso, adotou-se como critério:

$$SE \bar{P}_j < 5mm \text{ E } \bar{P}_j + \bar{P}_{j-1} < 10 mm \text{ ENTÃO } CT_{j,i} \text{ é cota de fluxo de base}$$

Onde:

$\bar{P}_i$  = Precipitação média da bacia do rio Sesmaria do dia  $j$  [mm]

$\bar{P}_{i-1}$  = Precipitação média da bacia do rio Sesmaria do dia  $j-1$  [mm]

$CT_{j,i}$  = Cota linimétrica do dia  $j$  da estação  $i$  [m]

Após identificadas as cotas referentes ao fluxo de base dos canais da bacia do rio Sesmaria, estas cotas foram correlacionadas com os dados do NA normalizado dos poços. Como por diversas vezes os dias em que foram realizadas as medições do NA dos poços não correspondiam às cotas de fluxo de base dos rios, foi utilizada a mediana da cota de base dos canais no período que compreendia os dois dias que antecediam, o dia da medição e os dois dias que sucediam a medição do NA nos poços.

## 5.5 PREPARAÇÃO DA BASE DIGITAL

Para a organização e processamento da base digital das cabeceiras de drenagem foi utilizada a base cartográfica da FIBRIA na escala 1:10.000 no ambiente dos programas ArcGIS 9.3, ArcCatalog 9.3 e ArcView 3.2. A base cartográfica fornecida pela FIBRIA estava em formato *\*.dwg*, projeção UTM 23S datum Córrego Alegre em quatro arquivos distintos (Fazendas Caximonan, Independência, São Pedro III e Monte Alegre). Optou-se por trabalhar com os arquivos digitais das quatro fazendas a fim de obter uma base completa para todas as fazendas com plantios de eucalipto inseridas na bacia do rio Sesmária, além do fato delas estarem dispostas de forma contígua, o que facilitou a interpretação.

Primeiramente, foi feita uma conversão dos arquivos *\*.dwg* separadamente (pontos, linhas e polígonos) para o formato shapefile (*\*.shp*), sendo posteriormente definida a projeção destes arquivos (UTM 23S Córrego Alegre) e, em seguida, os mesmos foram projetados para UTM 23S WGS84, utilizando os parâmetros de transformação sugeridos pelo IBGE. No passo seguinte, foram selecionados os itens que correspondiam às drenagens, curvas de nível e estradas a partir de informações contidas nas tabelas anexas e também por identificação visual dos itens selecionados, sendo estes exportados separadamente.

As drenagens tiveram a sua orientação (montante – jusante) checada e corrigida e também foram realizadas complementações das mesmas nos locais onde apresentavam falhas, assim como onde não estavam demarcadas. Para esta complementação foram utilizadas identificações de levantamento de campo, além da interpretação de imagens Geoeye de 2010 disponíveis no Google Earth 6.1. Os mesmos critérios de complementação e correção da base digital foram utilizados para os arquivos referentes às estradas não pavimentadas (ENPs), sendo também incluídas nesta categoria os aceiros das fazendas, que apresentam características bastante similares às ENPs: solo exposto e aproximadamente 5 metros de largura (Figura 46). Com relação às curvas de nível, nas tabelas anexadas aos arquivos não havia indicação da elevação das curvas de nível, apenas se as mesmas eram curvas mestras ou intermediárias. Com o auxílio de cartas 1:25.000 do IBGE (Carta Rio São João) foram identificados os valores das curvas de nível de maior elevação em cada colina nas quais havia picos com elevação cotada. A partir dessas informações, as

curvas tiveram a sua elevação determinada de forma semi-automática utilizando a extensão *Contour Labelling v. 1.2* do ArcView 3.2. Posteriormente, estes valores de elevação atribuídos às curvas de nível foram checados com os levantamentos de posicionamento relativo estático dos poços e vertedores, que validou esta etapa.



Figura 46 – Aceiro na cabeceira de drenagem Caximonan 01.

O georreferenciamento dos equipamentos (vertedores e poços) além dos marcos permanentes e temporários foi realizado com a utilização da técnica de posicionamento relativo estático. A primeira etapa consistiu na transposição de coordenadas da estação SAT GPS 93652 do centro de Bananal/SP para os marcos permanentes instalados na Fazenda Itamarati, que distam aproximadamente 19 Km em reta. Este levantamento foi realizado em agosto de 2011 com um par de equipamentos receptores GNSS L1/L2 Trimble, intervalo de aquisição de dados a cada 1 segundo e rastreamento de duração de 2 horas em cada marco. Em gabinete, estes pontos foram processados no software da Trimble e foram obtidas as seguintes coordenadas em projeção UTM Fuso 23S datum WGS84, com precisão X/Y/Z superior a 2 centímetros (Tabela 11).

Tabela 11 – Coordenadas dos marcos permanentes obtidas pós-processamento. h: elevação elipsoidal/geométrica, H: elevação geoidal/ortométrica.

Estação	Condição	X (m)	Y (m)	h (m)	H (m)	Projeção / Datum
SAT 93652	Base	569635,520	7491439,556	445,730	449,720	UTM 23S WGS84
Marco 01	Rover	555365,136	7504288,611	620,672	624,482	UTM 23S WGS84
Marco 02	Rover	555392,708	7504567,448	584,142	587,952	UTM 23S WGS84
Marco 03	Rover	555547,870	7504446,196	551,555	555,365	UTM 23S WGS84
Marco 04	Rover	555762,764	7504266,148	592,173	595,983	UTM 23S WGS84

O posicionamento dos equipamentos (vertedores e poços) e marcos temporários utilizados no levantamento de contorno de duas voçorocas foi realizado em duas campanhas de campo, sendo uma em abril de 2012 e outra em junho de 2012 (Tabela 12). Nestas campanhas foram utilizados os receptores GPS L1 modelo Astech ProMark 2 do Departamento de Geografia da UFRJ e a técnica utilizada foi igual a anterior: o posicionamento relativo estático (Figura 47). Nestas campanhas foram utilizados os marcos permanentes como estações de base, uma vez que estas já possuíam suas coordenadas definidas com elevada precisão através do primeiro levantamento/processamento realizado. As elevações elipsoidais/geométricas foram transformadas em geoidais/ortométricas utilizando-se a Equação (4) indicada pelo IBGE e com valores de altura/ondulação geoidal indicados pelo programa MAPGEO2010. A precisão mínima obtida neste levantamento foi de 10 cm, que ocorreu no ponto CAX01, localizado em um fundo de vale com cobertura de vegetação. De modo geral, a precisão foi superior a 4 centímetros.

$$H = h - N \quad (4)$$

Onde:

H = elevação geoidal/ortométrica

h = elevação elipsoidal/geométrica

N = altura/elevação geoidal

Tabela 12 – Coordenadas dos equipamentos e vértices temporários. h: elevação elipsoidal/geométrica, H: elevação geoidal/ortométrica.

Pontos	Descrição	X (m)	Y (m)	h (m)	H (m)	Projeção/Datum
CAX01	Vertedor	554926,887	7504780,964	489,406	493,206	UTM 23S WGS84
CAX02	Vertedor	554978,975	7504265,900	514,287	518,087	UTM 23S WGS84
IND01	Vertedor	553943,860	7500851,943	464,286	468,086	UTM 23S WGS84
IND02	Vertedor	554826,212	7500381,602	514,970	518,790	UTM 23S WGS84
P01	Poço	555080,795	7504114,530	523,946	527,746	UTM 23S WGS84
P02	Poço	555113,945	7504173,363	535,070	538,870	UTM 23S WGS84
P03	Poço	555142,843	7504134,849	540,393	544,203	UTM 23S WGS84
P04	Poço	554931,079	7504736,901	491,020	494,820	UTM 23S WGS84
P05	Poço	554970,686	7504709,802	506,233	510,033	UTM 23S WGS84
P07	Poço	554047,043	7500749,774	476,688	480,488	UTM 23S WGS84
P08	Poço	553972,560	7500752,549	481,660	485,460	UTM 23S WGS84
P09	Poço	553991,324	7500691,054	483,303	487,103	UTM 23S WGS84
P10	Poço	554856,392	7500334,691	521,965	525,785	UTM 23S WGS84
P11	Poço	554843,782	7500325,523	532,261	536,081	UTM 23S WGS84
P12	Poço	554824,449	7500331,311	538,639	542,459	UTM 23S WGS84
MT01	Marco Temporário	555788,157	7504317,540	583,412	587,222	UTM 23S WGS84
MT02	Marco Temporário	555762,744	7504412,129	538,293	542,103	UTM 23S WGS84
MT03	Marco Temporário	555733,501	7504464,500	524,550	528,360	UTM 23S WGS84
MT04	Marco Temporário	555759,138	7504464,626	528,876	532,686	UTM 23S WGS84
MT05	Marco Temporário	555748,651	7504543,984	524,451	528,261	UTM 23S WGS84
MT06	Marco Temporário	555744,118	7504592,437	524,470	528,280	UTM 23S WGS84
MT07	Marco Temporário	555643,197	7504460,584	526,947	530,757	UTM 23S WGS84
MT08	Marco Temporário	555574,159	7504436,416	546,410	550,220	UTM 23S WGS84
MT09	Marco Temporário	555252,306	7504638,201	609,959	613,759	UTM 23S WGS84
MT10	Marco Temporário	555360,841	7504747,340	578,567	582,367	UTM 23S WGS84
MT11	Marco Temporário	555435,367	7504665,603	560,180	563,990	UTM 23S WGS84



Figura 47 – Procedimento de georreferenciamento dos instrumentos por levantamento relativo estático. Esq.: estação base localizada no marco permanente 03. Dir.: detalhe do marco permanente.

## 5.6 ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS E CARGA DE SEDIMENTOS

A partir da base digital preparada, foi realizada a extração da área ocupada pelas estradas não pavimentadas (ENPs) em cada cabeceira de drenagem. Os pontos de saída d'água das ENPs foram definidos como locais onde havia evidências de saída de fluxos superficiais das ENPs para o interior dos plantios, para as áreas de preservação permanente ou diretamente para os canais de drenagem (Figura 48). Através de levantamentos de campo realizados em setembro de 2011 os pontos de saída d'água das ENPs foram identificados, fotografados e georreferenciados em projeção UTM 23S datum WGS84, sendo suas localizações realizadas através de um receptor GPS modelo Garmin 60CSx (Figura 49). Buscou-se determinar a posição de cada ponto através de uma média com cerca de 40 medições, o que, de modo geral, resultava em uma precisão de aproximadamente 4 m segundo informações do próprio receptor GPS.



Figura 48 – Indicação de uma saída d'água da ENP.



Figura 49 - Identificação e localização de uma saída d'água no interior do plantio.

O processamento dos dados envolveu também o estabelecimento das distâncias mínimas entre as saídas d'água e os canais de drenagem das cabeceiras de drenagem. Este processamento foi realizado através da ferramenta *Near* da caixa de ferramentas *Analysis Tools* do ArcGIS 9.3, tendo como arquivo de entrada os pontos das saídas d'água e arquivo de referência de distância a hidrografia das cabeceiras de drenagem. Com este procedimento, foi obtida a menor distância entre cada ponto referente às saídas d'água em relação à rede de drenagem.

Visando estabelecer uma relação das distâncias entre as saídas d'água e rede de drenagem, além do número total de saídas d'água por cabeceira de drenagem, foi proposta uma fórmula denominada Valor de Conectividade Estrada-Drenagem (VCED). Em uma análise comparativa, as estações que apresentarem maiores valores de VCED possuiriam uma maior conexão entre as ENPs e a rede de drenagem. O cálculo do VCED baseia-se na Equação (5):

$$VCED_i = \frac{SA_i}{\bar{D}_i} \quad (5)$$

Onde:

$VCED_i$  = valor de conectividade estrada-drenagem da bacia de drenagem  $i$

$SA_i$  = número de saídas d'água da bacia de drenagem  $i$

$\bar{D}_i$  = média das distâncias mínimas entre as saídas d'água e a rede de drenagem da bacia de drenagem  $i$

A carga de sedimentos (CS) avaliada neste estudo consiste no somatório dos sedimentos em suspensão e os sedimentos dissolvidos. Para realizar o estudo sobre a CS foram coletadas semanalmente três amostras de 500 mL nas quatro cabeceiras de drenagem, sendo as amostras coletadas a partir da água de eflúvio dos vertedores destas cabeceiras. Para a análise da concentração de sedimento nas amostras foi utilizado o método de evaporação e pesagem (DNAEE, 1970 *apud* CARVALHO, 2008) adaptado, que consiste em:

- Homogeneização por agitação manual da amostra;
- Separação 200 mL da amostra com auxílio de um funil e proveta graduada;
- Colocação o volume medido em um recipiente de peso conhecido;
- Colocação do conjunto recipiente + amostra na estufa, com termostato calibrado em 105 °C;
- Após secagem, o material foi retirado, colocado em um dessecador e posteriormente pesado em balança analítica marca Bosh S2000, com precisão de quatro (4) casas decimais;
- A diferença de peso do recipiente antes e após a secagem foi definida como a CS em g/200mL. Os resultados foram transformados para g/L;

Em um primeiro momento, buscou-se relacionar a CS com a turbidez da água de eflúvio das cabeceiras de drenagem. Foram instalados turbidímetros (Global Water WQ301 – faixa de 0 – 1000 NTU) previamente calibrados em laboratório junto às régua linimétricas nas estações das cabeceiras de drenagem, sendo estes equipamentos conectados a dataloggers com aquisição em intervalos de cinco minutos. Os primeiros resultados indicavam um aumento crescente da turbidez e posteriormente verificou-se que isto ocorria em virtude da aderência de partículas e a formação de um microfilme ao redor das lentes do turbidímetro, o que acarretava em falsas leituras de turbidez crescente. Posteriormente, iniciou-se a leitura mensal destes sensores visando remover partículas aderidas às lentes, mas observou-se que esta periodicidade era insuficiente e que as leituras após a limpeza não retornavam aos patamares anteriores. Em virtude dessas dificuldades encontradas, o monitoramento da turbidez foi cancelado e seus dados não foram utilizados.

## 5.7 EVOLUÇÃO DE VOÇOROCAS

Duas voçorocas em cabeceiras de drenagem vizinhas às estações Caximonan 01 e Caximonan 02 localizadas na Fazenda Itamarati tiveram seu contorno delineado em 10 de abril de 2012 (Voçoroca 01) e 19 de maio de 2012 (Voçoroca 02). Este levantamento foi realizado utilizando estação total Trimble modelo 3302 DR com apoio da rede de marcos permanente e temporários que tiveram suas coordenadas X/Y/Z definidas com precisão (Figura 50 e 51), conforme apontado na seção 5.5.

Foi realizado um levantamento qualitativo do estado de atividade destas voçorocas ao longo do tempo através de um levantamento de imagens de sensores orbitais disponíveis no Google Earth (Ikonos – 07/02/2003, Geoeye – 21/08/2010) e fotografias aéreas (IBGE – 2004) desta mesma área. Como ocorreu sobreposição visual de posição entre o levantamento de campo realizado em 2012 com as imagens Ikonos e Geoeye disponíveis no Google Earth, foi realizada uma estimativa da velocidade de evolução destas voçorocas, embora seja de uma estimativa de baixa precisão, uma vez que as imagens originais não foram ortorretificadas e georreferenciadas com precisão. Para o cálculo destas estimativas de evolução, utilizou-se a ferramenta “Régua” do Google Earth 6.1, com cálculo das diferenças entre as posições dos dígitos das voçorocas tanto em superfície projetada como superfície inclinada.

Através de comparações das imagens de satélite, fotografias aéreas e levantamentos de campo, buscou-se avaliar as possíveis relações entre a implantação dos plantios de eucalipto neste local e a ativação e desenvolvimento de processos erosivos por água subterrânea (voçorocas).



Figura 50 – Rede de marcos permanentes (MP) e temporários (MT) para o delineamento das voçorocas.



Figura 51 – Levantamento do contorno das voçorocas com a utilização de estação total com o apoio da rede de marcos permanentes e temporários. Na foto, observa-se o levantamento do contorno da Voçoroca 02 a partir do marco temporário #11.

## 5.8 MODELAGEM HIDROLÓGICA HISTÓRICA

Foram simuladas as alterações hidrológicas decorrentes dessas sucessivas alterações de uso e cobertura do solo utilizando a bacia do rio Sesmaria como uma área representativa das alterações de uso e cobertura do MVRPS (áreas de floresta ombrófila densa convertidas em plantações de café, posteriormente transformadas em pastagens e finalmente convertidas em plantios de eucalipto). Esta simulação foi realizada de forma simplificada, buscando ressaltar os impactos hidrológicos que estas alterações proporcionariam no MVRPS nos últimos dois séculos e meio, discutindo seus potenciais efeitos erosivos nas bacias de drenagem.

A modelagem hidrológica foi baseada no princípio do atualismo, que assume que os fenômenos observados atualmente teriam ocorrido de forma similar no passado. Neste caso, as análises foram baseadas nos resultados atualmente observados decorrentes de alterações de uso/cobertura vegetal em bacias hidrográficas, sendo assumido que ocorreram de forma semelhante no passado histórico do MVRPS.

Todos os dados trabalhados foram baseados em médias anuais, não estando contempladas nesta modelagem as variações sazonais ou sequer o potencial impacto de eventos extremos na dinâmica hidro-sedimentar desta região, apesar da sua reconhecida importância (COELHO NETTO, 1999). Nesta modelagem, as entradas de água pela precipitação foram diferenciadas entre o domínio montanhoso e colinoso, sendo esta partição de domínios feita a partir do mapeamento geomorfológico de Dantas (no prelo) para a bacia do rio Sesmaria. Os dados pluviométricos médios anuais para os diferentes domínios geomorfológicos foram aqueles apontados por Sato (2008), sendo de 1.996 mm no compartimento montanhoso e de 1.509 mm no domínio de colinas. Calculou-se a precipitação anual média a partir da ponderação dos índices anuais médios destes dois domínios pela área da bacia do rio Sesmaria correspondente ao domínio montanhoso e colinoso. A bacia do rio Sesmaria é dividida em dois domínios geomorfológicos: o montanhoso, que corresponde a 19,6% da área total, e o domínio colinoso, correspondendo a 80,4% da área da bacia. Baseado nos índices pluviométricos médios para estes dois domínios, obteve-se uma precipitação anual média para a bacia do rio Sesmaria de 1604 mm.

A evapotranspiração foi diferenciada em dois grupos (formações arbóreas e pastagens), utilizando as equações apontadas por Zhang *et al.* (2001) a partir da compilação de 250 trabalhos em diversas regiões do mundo, sendo definidas pela Equação (6) para bacias de drenagem florestadas e pela Equação (7) para bacias de drenagem cobertas por pastagem.

$$ET = \left( \frac{1 + 2 \frac{1410}{P}}{1 + 2 \frac{1410}{P} + \frac{P}{1410}} \right) \times P \quad (6)$$

$$ET = \left( \frac{1 + 0,5 \frac{1100}{P}}{1 + 0,5 \frac{1100}{P} + \frac{P}{1100}} \right) \times P \quad (7)$$

Onde:

ET = evapotranspiração anual média

P = precipitação anual média

As simulações de uso e cobertura do solo foram realizadas a partir do mapeamento de uso e cobertura do solo realizado por Vianna *et al.* (2007), indicado na Figura 28. Foram realizadas três simulações: 1ª) correspondente a uma condição antecedente ao Ciclo do Café na bacia, com a área da bacia praticamente totalmente recoberta por vegetação ombrófila densa; 2ª) correspondente à paisagem da bacia com a conversão dos plantios de café em pastagens; e 3ª) correspondente ao retrato atual da bacia com o predomínio de pastagens, ocorrência de fragmentos de floresta ombrófila e manchas de plantios de eucalipto (Figura 52).

Baseado na comparação das simulações 01 e 02, foram realizadas discussões sobre a conversão de grande parte da vegetação nativa em pastagens sucedendo os plantios de café. O retrato de uma paisagem dominada pelos plantios de café não foi simulado, uma vez que o trabalho de Zhang *et al.* (2001) apenas definiu modelos para coberturas arbóreas e de pastagens. Entretanto, estes autores indicaram que coberturas vegetais com porte intermediário entre as pastagens e as florestas proporcionariam taxas de evapotranspiração anuais intermediárias entre estes dois tipos de coberturas vegetais. Comparando as situações 02 e 03, discutiu-se a potencialidade dos impactos hidrológicos da introdução de manchas de plantios de eucalipto na bacia do rio Sesmaria.

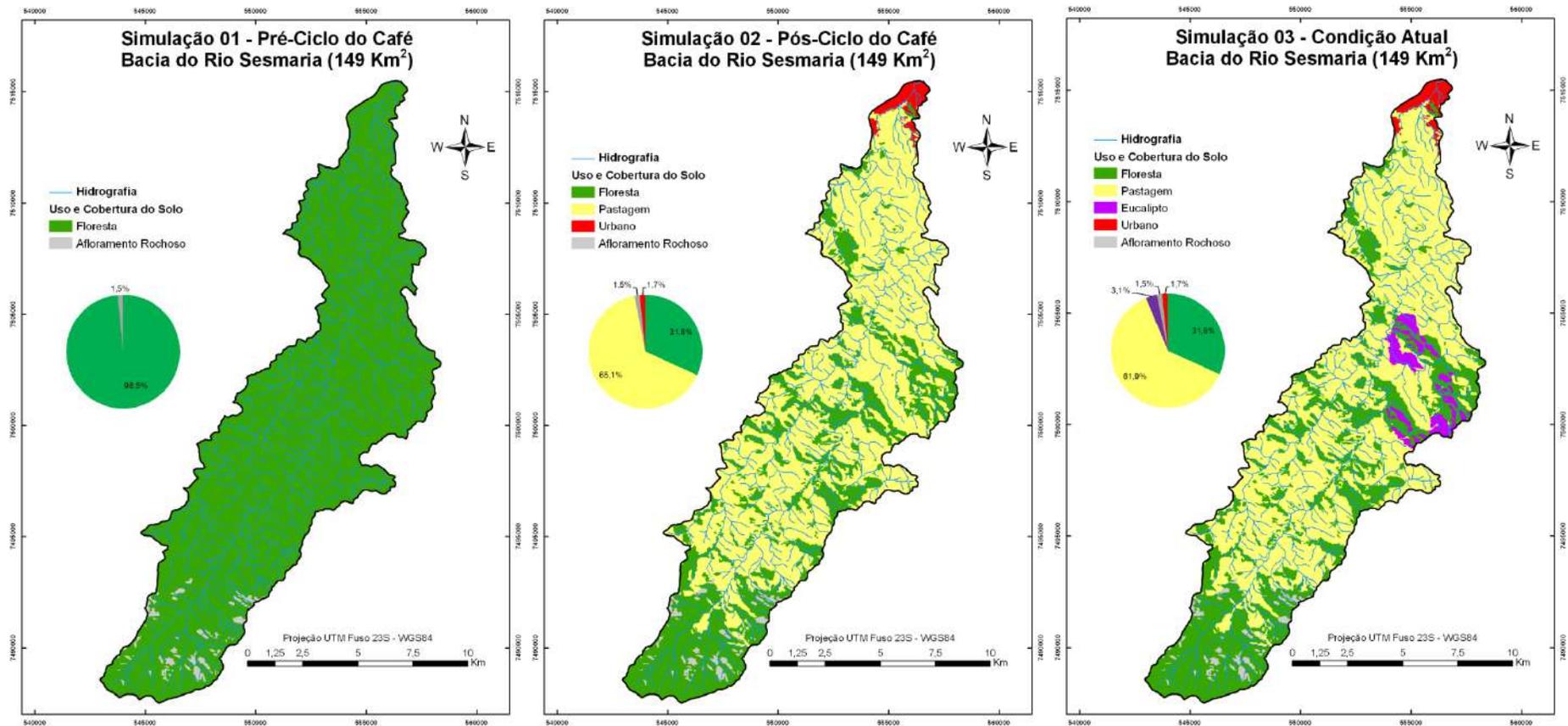


Figura 52 – Simulações da paisagem da bacia do rio Sesmaria. Simulação 01: período pré-ciclo do café (esq.), Simulação 02: pós-ciclo do café (centro) e Simulação 03: condição atual (dir.).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 PRECIPITAÇÃO

A precipitação mensal das estações Sesmaria, São João, Monte Alegre, Formoso, Feio e Barra indica que a estação Barra (período de dados de junho 2009 a fevereiro de 2012) foi a estação que apresentou maior precipitação média mensal (157 mm), conforme observado na Figura 53 e Tabela 13. De modo geral, os valores de precipitação são maiores nas áreas montanhosas do que nas áreas de colinas do MVRPS devido ao efeito orográfico das serras (Sato, 2008). Esta estação destacou-se das demais em alguns meses do período chuvoso, com os meses novembro e dezembro de 2009, março de 2010 e janeiro de 2011.

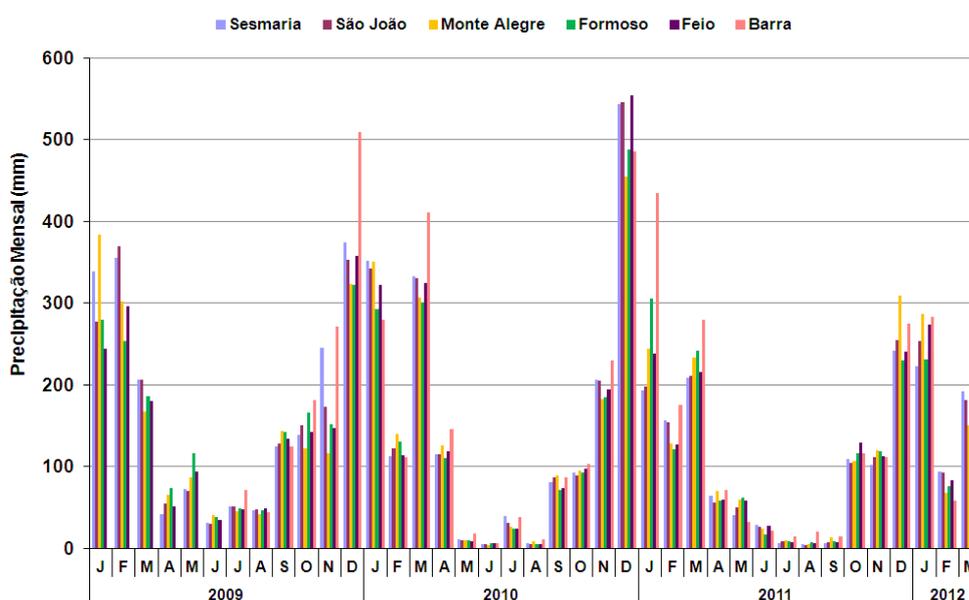


Figura 53 – Precipitação mensal das estações Sesmaria, São João, Monte Alegre, Formoso, Feio e Barra.

Tabela 13 – Dados de precipitação das estações Sesmaria (SM), São João (SJ), Monte Alegre (MA), Formoso (FM), Feio (FE) e Barra (BR). Obs.: \*: dados até o mês de março, \*\*: dados a partir de 16 de junho de 2009.

Dados	SM	SJ	MA	FM	FE	BR
Precipitação 2009 (mm)	2027	1911	1838	1822	1777	1217**
Precipitação 2010 (mm)	1894	1886	1792	1715	1840	1927
Precipitação 2011 (mm)	1161	1185	1322	1294	1229	1566
Precipitação 2012 (mm)*	508	527	505	459	547	342
Dias sem Precipitação (%)	66,7	66,7	66,5	67,2	67,3	55,2
Dias com Precipitação (%)	33,3	33,3	33,5	32,8	32,7	44,8

Na comparação da precipitação dos valores médios das estações do domínio de colinas (Sesmaria, São João, Monte Alegre, Formoso e Feio) com a média histórica para este mesmo domínio no MVRPS, observa-se que os anos de 2009 e 2010 foram anos bastante chuvosos, enquanto 2011 e o início de 2012 caracterizam-se como períodos de chuvas constantemente abaixo da média (Figuras 54 e 55). Embora as variações dos anos de 2009 e 2010 sejam similares (2009: +366 mm, 2010: +317 mm), observa-se que a distribuição das chuvas foi bastante diferenciada, tendo sido o ano de 2009 mais constantemente positivo do que o ano de 2010, ao qual se atribui grande parte da sua variação positiva ao mês de dezembro, que teve uma variação de +270 mm em relação à média histórica. O ano de 2011 totalizou uma variação de -271 mm, com praticamente todos os meses do ano apresentando índices pluviométricos inferiores à média regional. O início do ano de 2012 também seguiu esta tendência de baixos valores de precipitação, acumulando até o mês de março uma variação de -145 mm.

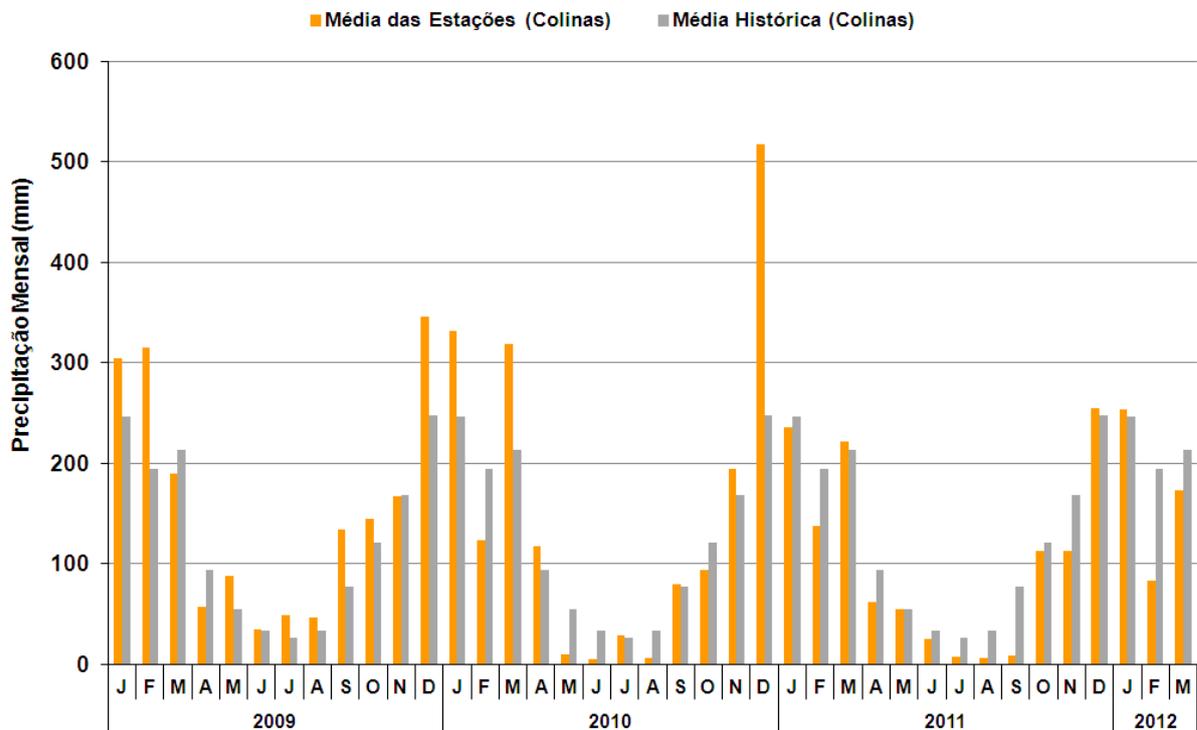


Figura 54 – Precipitação mensal média das estações localizadas no domínio de colinas da bacia do rio Sesmaria (Sesmaria, São João, Monte Alegre, Formoso e Feio) na comparação com a precipitação média histórica.

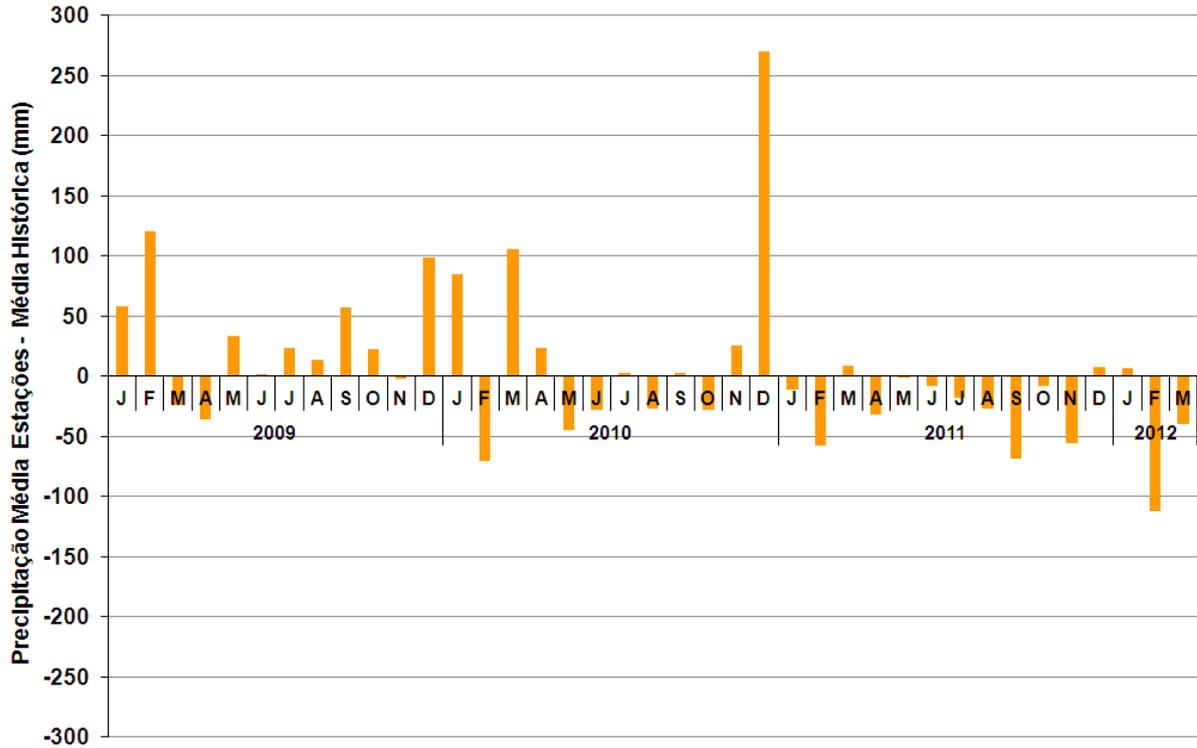


Figura 55 – Diferença entre a precipitação mensal média das estações localizadas no domínio de colinas da bacia do rio Sesmaria (Sesmaria, São João, Monte Alegre, Formoso e Feio) em relação à precipitação média histórica do domínio de colinas do MVRPS.

De modo geral, o domínio montanhoso da bacia do rio Sesmaria, representado pelos dados da estação Barra, apresentou tendência similar ao domínio de colinas na parcial de junho a dezembro de 2009, apontando variação de +343 mm (Figuras 56 e 57). Já em 2010 a variação foi praticamente nula (-38 mm), sendo os períodos seguintes marcados por elevadas variações negativas (2011: -399 mm, jan-fev 2012: -268 mm).

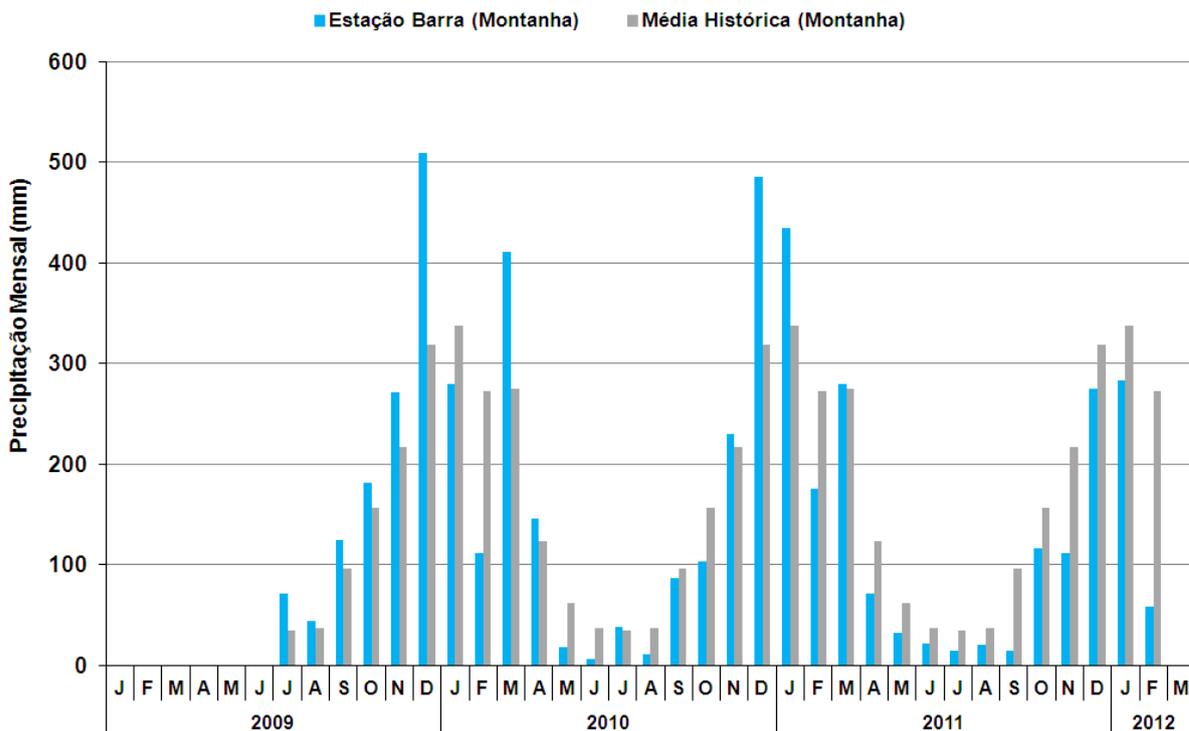


Figura 56 – Precipitação mensal da estação localizada no domínio montanhoso da bacia do rio Sesmaria (Barra) na comparação com a precipitação média histórica do domínio montanhoso do MVRPS.

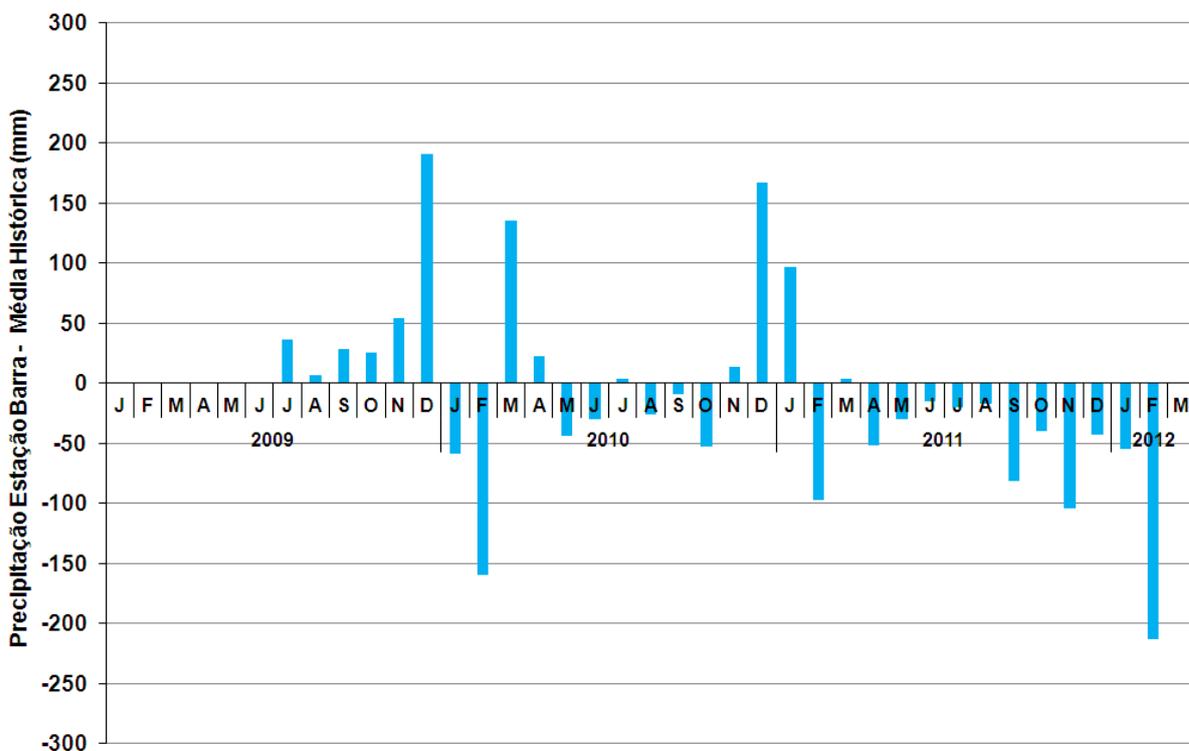


Figura 57 – Diferença entre a precipitação mensal média das estações Sesmaria, São João, Monte Alegre, Formoso, Feio e Barra e a precipitação média histórica do domínio de colinas do MVRPS.

A avaliação da precipitação diária indica que em 48% dos dias entre janeiro de 2009 e março de 2012 ocorreram chuvas em ao menos uma estação da bacia do rio Sesmaria, contraposto a 52% dos dias sem chuva em nenhuma das estações. A análise dos dados de precipitação diária por estação aponta para uma diferenciação no padrão de ocorrência de chuvas entre as estações do domínio de colinas e a estação Barra (Figura 58). A estação Barra apresentou precipitação em 45% dos dias analisados, contrastando com os 33% das estações no domínio de colinas. Embora a estação Barra apresente os maiores índices pluviométricos e a maior ocorrência de dias chuvosos, esta diferença é maior na classe de chuvas com os menores acumulados (0 – 5 mm), sendo mais frequentes que nas demais estações, e nas classes 5 – 10 mm e 10 – 20 mm, apresentando menor frequência de chuvas nestas últimas duas classes. Nas frequências de precipitações diárias > 50 mm não foi detectada diferenciação entre as estações (Figura 59). Baseado no período analisado, os resultados indicam que os valores mais elevados de precipitação acumulada no domínio montanhoso estão relacionados com a maior frequência de dias chuvosos e não com a ocorrência de eventos de maior volume.

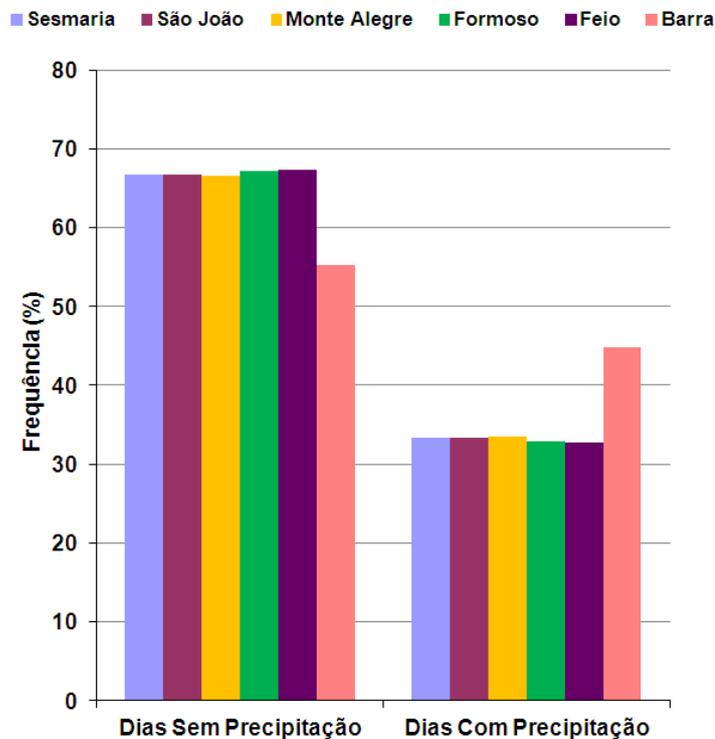


Figura 58 – Frequência de ocorrência de dias com e sem precipitação.

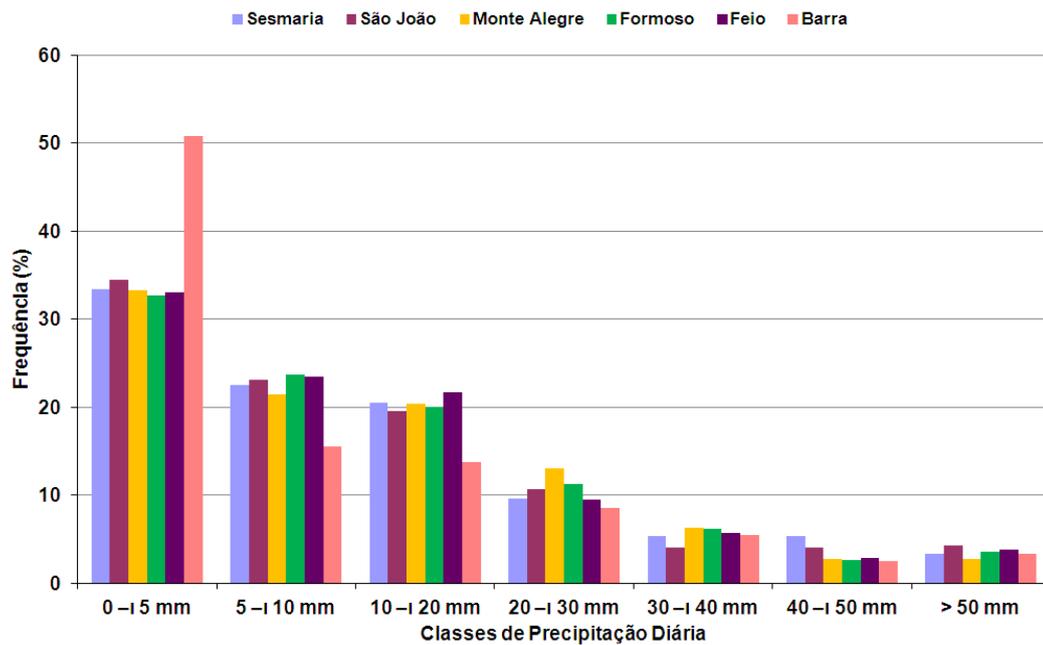


Figura 59 – Distribuição da precipitação diária em classes por estação.

## 6.2 ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS E CARGA DE SEDIMENTOS<sup>11</sup>

As estradas não pavimentadas (ENPs) possuem características bastante distintas entre as cabeceiras de drenagem, conforme indicado na Tabela 14 e Figura 61 e 61. A estação Independência 01 apresenta a maior proporção de sua área coberta por ENPs (5,9%), sendo a segunda em extensão total (1.641 m). Esta estação também se destaca por apresentar duas intersecções das ENPs com a rede de drenagem, maior número de saídas d'água (N = 45) e maior proporção de saídas d'água em relação à área da cabeceira de drenagem e em relação à área de ENPs. As saídas d'água desta estação distam em média 72,5 m dos canais de drenagem, o terceiro mais baixo, mas a o Valor de Conectividade Estrada-Drenagem (VCED) é o mais elevado (0,62), impulsionado, principalmente, pelo elevado número de saídas d'água desta estação. Nesta estação observa-se que as saídas d'água estão em sua maioria com distâncias entre 50 e 100 m da rede de drenagem, embora também ocorram alguns casos que estas saídas estão muito próximas aos canais de drenagem (< 10 m).

<sup>11</sup> Parte dos resultados descritos nesta seção correspondem aos resultados da Monografia de Graduação de Ferreira (2011), defendida no curso de graduação em Ciências Biológicas da Universidade Federal Fluminense, co-orientado pelo presente autor.

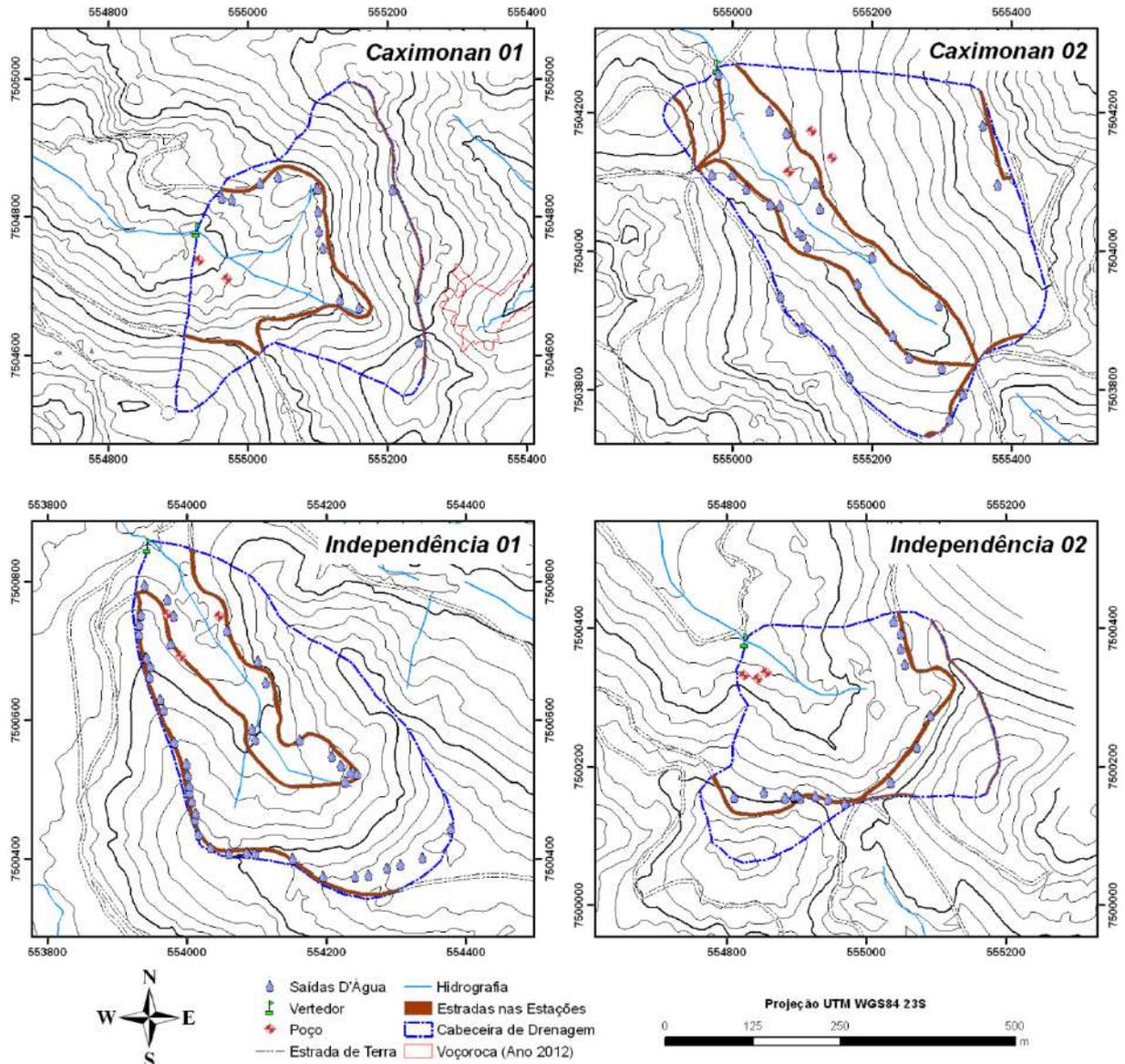


Figura 60 – Localização de saídas d’água das ENPs nas estações estudadas.

Contrastando com a estação Independência 01, a estação Independência 02 possui a menor proporção de área com ENPs (4,1%), menor extensão (841 m) e o mais baixo valor de VCED. Observa-se que as poucas saídas d’água (N=17) estão localizadas uma distância média de 133,4 m em relação às drenagens, aproximadamente 1,8 vezes maior que na Independência 01 e três vezes maior que na estação Caximonan 01. Pela interpretação da Figura 61 observa-se que na estação Independência 02 não existem saídas d’água com distâncias inferiores a 50 m em relação à rede de drenagem. A estação Caximonan 01 apresenta uma intersecção das ENPs com a rede de drenagem, mas possui o menor número de saídas d’água, apesar destas poucas saídas d’água estarem a pequenas distâncias médias da rede

de drenagem (45,3 m). A estação Caximonan 02 se destaca por possuir a maior área e extensão de ENPs, sendo a que apresenta a segunda maior relação entre a área das ENPs e a área da bacia dentre as quatro estações. As saídas d'água distam em média 70 m da rede de drenagem, que associado à segunda maior ocorrência de saídas d'água, resultou no segundo maior VCED, sendo mais frequentes as saídas d'água que distam mais que 100 m da rede de drenagem.

Tabela 14 – Dados das ENPs por cabeceira de drenagem.  $A_B$ : área da bacia,  $A_E$ : área de estradas,  $C_E$ : comprimento total de estradas,  $CD$ : cruzamentos das estradas com drenagens.  $SA$ : saídas d'água,  $\bar{D}_{SA}$ : distância média das saídas d'água em relação ao canal mais próximo,  $VCED$ : valor de conectividade estrada-drenagem ( $SA/\bar{D}_{SA}$ ).

Parâmetros	Cax 01	Cax 02	Ind 01	Ind 02
$A_B$ (ha)	10,70	18,02	14,02	10,15
$A_E$ (ha)	0,46	0,85	0,82	0,42
$\hat{A}_E/A_B$ (%)	4,3	4,7	5,9	4,1
$C_E$ (m)	925	1.701	1.641	841
$C_E/A_B$ (m/ha)	86,4	94,4	117,0	82,9
$CD$ (N)	1	0	2	0
$SA$ (N)	13	27	45	17
$SA/A_B$ (N/ha)	1,2	1,5	3,2	1,7
$SA/A_E$ (N/ha)	28,1	31,7	54,9	40,4
$\bar{D}_{SA}$ (m)	45,3	69,8	72,5	133,4
$VCED$	0,29	0,39	0,62	0,13

Observado os dados de comprimento de estradas em relação à área das cabeceiras de drenagem, conclui-se que estas áreas possuem elevada densidade de estradas. De acordo com a FAO (1989), a densidade ideal de estradas em plantios florestais que visem a proteção e estabilidade ambiental deve estar entre 30 e 40 m/ha. Os resultados encontrados foram 2,16, 2,36, 2,93 e 2,07 vezes maior do que o máximo recomendado pela FAO (*op. cit.*) para as cabeceiras Caximonan 01, Caximonan 02, Independência 01 e Independência 02, respectivamente.

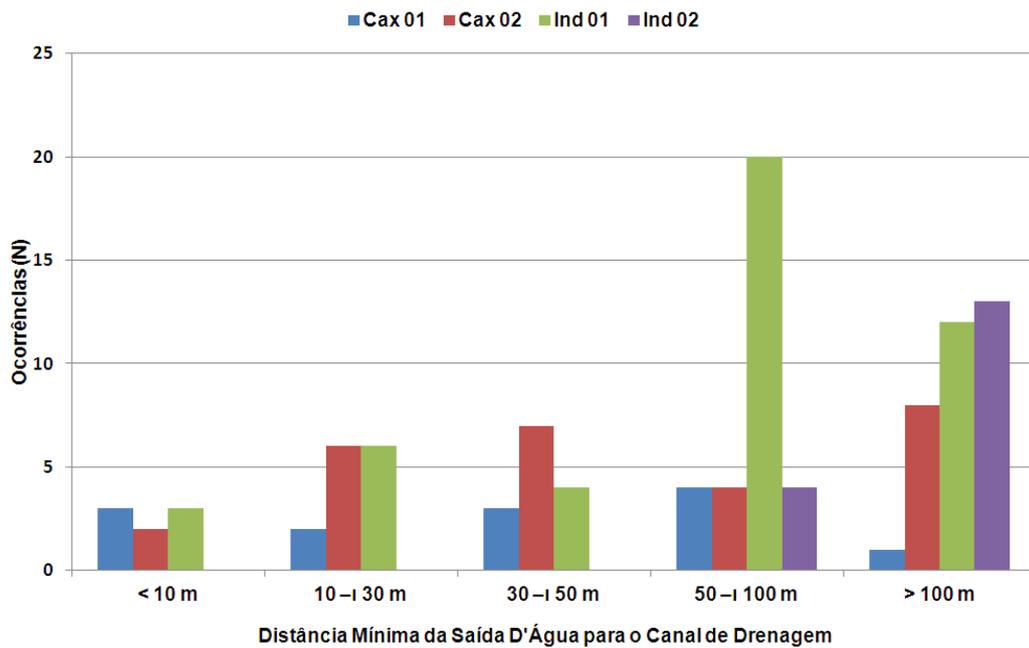


Figura 61 – Distância mínima entre as saídas d'água e a rede de drenagem.

A carga de sedimentos (CS) apresentou grande variação ao longo do período avaliado (Figura 62), demonstrado pelos elevados coeficientes de variação dos dados (Tabela 15). Os dados médios indicam que a CS foi maior na estação Independência 01 (50,0 mg/L), seguido da Independência 02 (42,9 mg/L), com pequena diferença entre as estações Caximonan 01 (19,8 mg/L) e Caximonan 02 (21,6 mg/L). Como não foi levantado se chovia ou não durante o momento da coleta das amostras, não é possível afirmar se as amostras correspondem ou não a amostragens durante os fluxos de chuva, uma vez que as cabeceiras de drenagem apresentam respostas rápidas nos exutórios aos eventos de chuva. Ao se comparar a CS com a chuva referente ao dia da coleta, conclui-se que estes dados não apresentam correlação, uma vez que a coleta das amostras ocorreu na maioria das vezes em dias que não choveram, logo em fluxo de base nos canais fluviais. Mesmo sem a ocorrência de chuvas, foram identificadas grandes variações nos resultados (Figura 63).

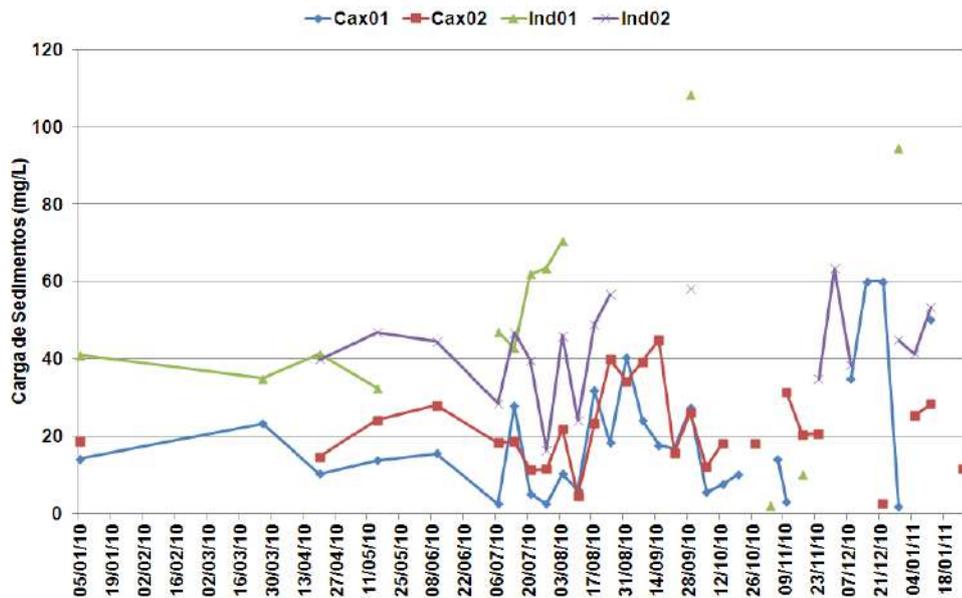


Figura 62 – Variação temporal da carga de sedimentos por estação.

Tabela 15 – Dados de carga de sedimentos por estação.

Parâmetros	Cax 01	Cax 02	Ind 01	Ind 02
Média (mg/L)	19,8	21,6	50,0	42,9
Desvio padrão (mg/L)	16,6	10,3	29,9	11,9
Coefficiente de variação (%)	84,0	47,7	59,8	27,7
Máximo (mg/L)	60,0	45,0	108,2	63,3
Mínimo (mg/L)	1,8	2,5	2,2	16,5

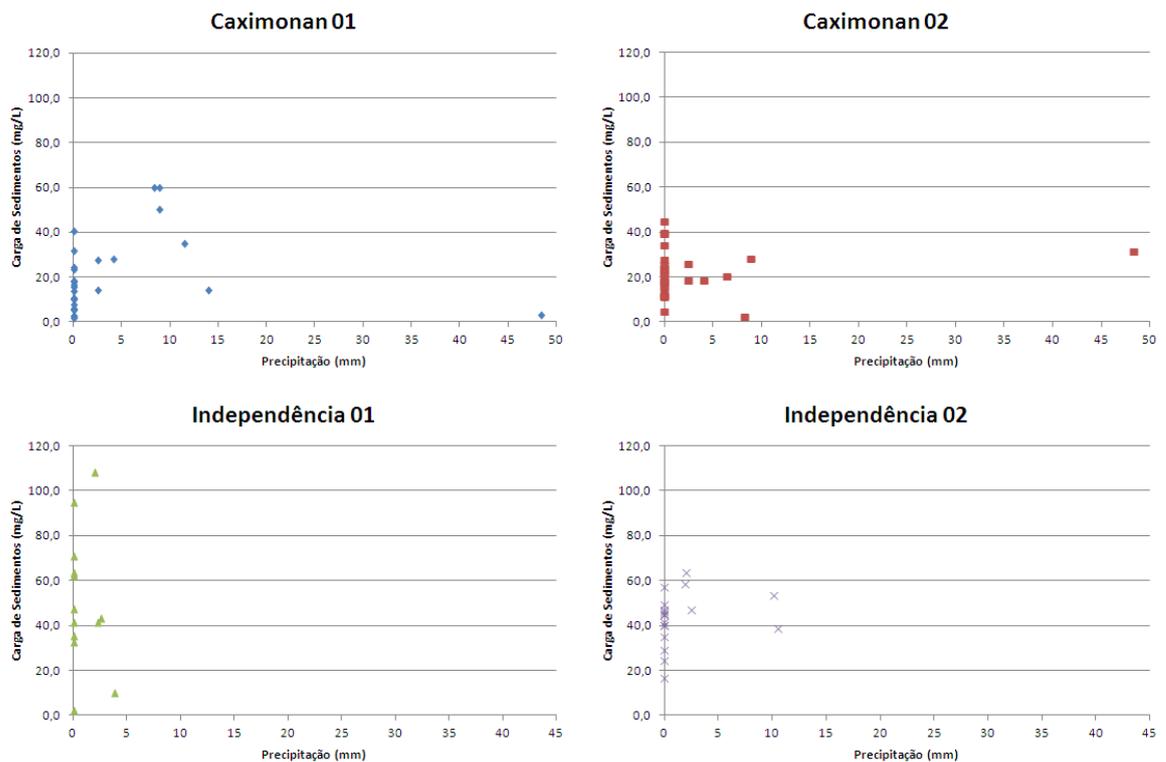


Figura 63 – Relação da carga de sedimentos com a precipitação do dia da coleta.

A estação Independência 01 apresentou a maior concentração média de sedimentos no exutório e também possuía parâmetros das ENPs que favoreceriam à erosão e distribuição dos sedimentos para os canais de drenagem, como altos valores de cobertura das estradas em relação à área da bacia, densidade de estradas, cruzamentos com drenagens, número de fugas d'água e VCED.

Por outro lado, a estação que apresentava os parâmetros mais conservativos das ENPs (estação Independência 02), foi a que apresentou a segunda maior CS. A elevada CS das estações localizadas na fazenda Independência também pode estar relacionada com o fato dos fundos de vale dessas áreas serem de modo geral mal drenados, com a presença de espessos pacotes sedimentares e presença de muita vegetação característica de áreas alagadas, especialmente espécies do gênero *Typha*. De algum modo a passagem da água por estas áreas enriquece a água com material sedimentar e orgânico desses fundos de vale, o que aumenta visivelmente a turbidez da mesma em relação às estações da fazenda Caximonan. Ao que as análises de laboratório e as observações de campo indicaram, esta combinação de características das ENPs associadas aos depósitos e vegetação de fundo de vale seriam as razões para a diferenciação entre das estações das fazendas Independência e Caximonan.

Camara e Lima (1999) monitoraram a CS em suspensão em um plantio de eucalipto antes e após o corte utilizando esta mesma forma de amostragem (semanal) e também obtiveram baixas concentrações de sedimentos. Os resultados destes autores indicaram valores que variaram de 0,5 a 19,2 mg/L antes do corte e de 1,5 a 15,9 mg/L após o corte. Conforme ressaltado pelos autores, embora o valor máximo identificado após o corte tivesse sido menor que antes do corte, existiam evidências de campo que indicavam uma maior produção de sedimentos, em virtude dos distúrbios que ocorreram no solo pelo ato da colheita, como a passagem de maquinário pesado e o arraste das toras.

Evidências de campo sugeriam que o processo de erosão e transporte de sedimentos para o canal estivesse ocorrendo, mesmo que não tenha sido detectado pelos resultados da CS. Em novembro de 2010 foi realizada a reforma das estradas em toda área de estudo com a utilização de maquinário pesado (Patrol e tratores). Neste procedimento de reforma das ENPs ocorre a remoção de uma camada superficial da ENP para que ocorra o nivelamento da mesma, sendo este material depositado à margem jusante das estradas. Estes sedimentos depositados às

margens da estrada possuíam elevada erodibilidade, uma vez que estavam completamente desagregados e expostos às chuvas. A reforma da ENPs além de alterar a superfície das estradas, também modifica o padrão de escoamento nas mesmas. Após a reforma das estradas na estação Caximonan 02, formou-se uma saída d'água imediatamente a montante do vertedor, que certamente contribuiu significativamente para o assoreamento do mesmo, com evidências deste fluxo sendo observadas em campo (Figura 64).



Figura 64 – Relação da reforma das ENPs com o aumento da carga de sedimentos na estação Caximonan 02. Esq.: em primeiro plano, observa-se o solo exposto revolvido e desagregado em virtude da reforma das ENPs, assim como a ocorrência de uma fuga d'água (seta azul), que direciona os fluxos para um ponto imediatamente a montante do vertedor. A seta vermelha indica a posição do pluviômetro e do datalogger. Dir.: limpeza do vertedor após o assoreamento em virtude do aumento da carga de sedimentos após a reforma das ENPs.

Lane e Sheridan (2002) avaliaram a influência do cruzamento de uma ENP com uma linha de drenagem, monitorando a turbidez e a carga de sedimentos em um ponto a montante e outro a jusante simultaneamente. Os dados indicaram que ao longo de todo o período ocorreram diferenças entre estes dois pontos, com maiores valores de turbidez e carga de sedimentos nos pontos a jusante. Durante os momentos de fluxo de base foram registrados em média 3,7 e 1,7 NTU e 9,9 e 2,8 mg/L nas áreas de jusante e montante, respectivamente, alterando para valores máximos de 468,6 e 45,6 NTU e 1.236,9 e 144,0 mg/L durante os fluxos de chuva. Estes resultados já demonstram uma pequena influência durante o fluxo de base, mas ressalta as grandes diferenças durante os fluxos de chuva.

Esse aumento da CS em virtude da reforma das ENPs, não foi indicado pelas amostragens, pelo fato delas terem sido realizadas em intervalos fixos (semanalmente). A amostragem em intervalos longos e fixos, como o realizado no

presente estudo, mostrou-se inadequada ao estudo de erosão, servindo apenas para fornecer dados de referência para a comparação com a amostragem ao longo dos eventos de chuva, quando os processos erosivos se intensificam. Minella (2009) indicou que mesmo em eventos de chuva de baixa intensidade, o transporte de sedimentos é reduzido, estando este transporte relacionado aos eventos chuvosos de média a alta intensidade. Este autor coletou amostras de carga de sedimentos em suspensão durante o fluxo de base e durante eventos chuvosos em uma bacia com diferentes usos do solo, variando entre lavouras, plantação de tabaco e gramínea. A média de CSS durante o fluxo de base foi de 20,0 mg/L, e a média durante o fluxo de chuva foi de 81,7 mg/L. Mas durante um evento de chuva de 145 mm, foi obtido o maior valor de CSS do estudo (11.420 mg/L).

Ao longo do período de monitoramento, ficou evidente também a importância desses eventos de maior volume na mobilização dos sedimentos. Especialmente na estação Caximonan 01, que apresenta o maior gradiente de bacia, ocorreram ao menos três episódios de assoreamento dos vertedores. Embora não tenha sido realizado um monitoramento contínuo do assoreamento da porção a montante dos vertedores, as observações de campo indicam que este assoreamento não ocorreu de forma gradual e sim de forma episódica, em resposta aos eventos de maior chuva. Nas demais estações também foram feitas manutenções de desassoreamento dos vertedores, mas em apenas uma oportunidade nas estações Independência 01 e 02 e duas oportunidades na estação Caximonan 01, sendo uma destas manutenções claramente relacionadas com a manutenção das ENPs, conforme reportado anteriormente. Estes resultados reforçam que estas cabeceiras de drenagem com plantios de eucalipto são importantes fontes de sedimentos durante os eventos de chuva e que a manutenção das ENPs ampliou a exportação de sedimentos.

### 6.3 OSCILAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO

Todos os poços apresentaram água em algum momento no período de monitoramento, com exceção do P12, que foi instalado na encosta a uma profundidade total de 18,2 m, mas que em nenhum momento indicou o NA. Por esta razão, os dados deste poço não foram incluídos nas análises, embora esta condição expresse uma grande profundidade do NA neste ponto.

Conforme observado na Figura 65, a granulometria dos poços na porção superior do solo é geralmente argilosa (classes argila, franco-argiloarenosa e franco-argilosa) e com o aumento da profundidade os percentuais de areia se elevam. Nos poços mais profundos, geralmente as amostras mais profundas indicaram a classe franco-arenosa. A profundidade em que ocorre esta alteração do predomínio da argila para a areia é bastante variável e depende de controles locais, como a morfologia do ponto, que pode ter favorecido o depósito de colúvios em espessuras variáveis.

Os poços apresentam grande diferença na oscilação do NA, especialmente na comparação dos localizados no fundo de vale e na baixa-média encosta (Figura 66 e Tabela 16). Os poços P4, P7 são os que apresentam maior variação ao longo do tempo, demonstrado pelo maior coeficiente de variação na comparação com os demais poços das suas respectivas estações. O P1, que embora esteja localizado no fundo de vale, apresentou o segundo menor coeficiente de variação, o que representa grande estabilidade do NA ao longo do período de monitoramento. Avaliações de campo indicam que este poço é o único que apresenta grande desenvolvimento de raízes no seu interior, demonstrando que a vegetação arbórea nativa de médio porte da faixa marginal de proteção do canal de drenagem extrai água diretamente da zona saturada, atuando como freatófitas. É bastante provável que a vegetação neste ponto esteja balanceando as entradas de água pela transpiração, assim como este consumo esteja sendo anulado em grande parte pelo deslocamento da água vindo da encosta adjacente. A Figura 67 indica que a elevação do NA deste poço está abaixo da elevação do NA de P2 e P3, apontando para um potencial deslocamento da água subterrânea para este ponto. Também se destaca o fato dos poços P2 e P3, assim como P10 e P11 apresentarem baixos coeficientes de variação (Tabela 16) e apresentarem as maiores elevações do NA, todas acima de 520 m (Figura 67).

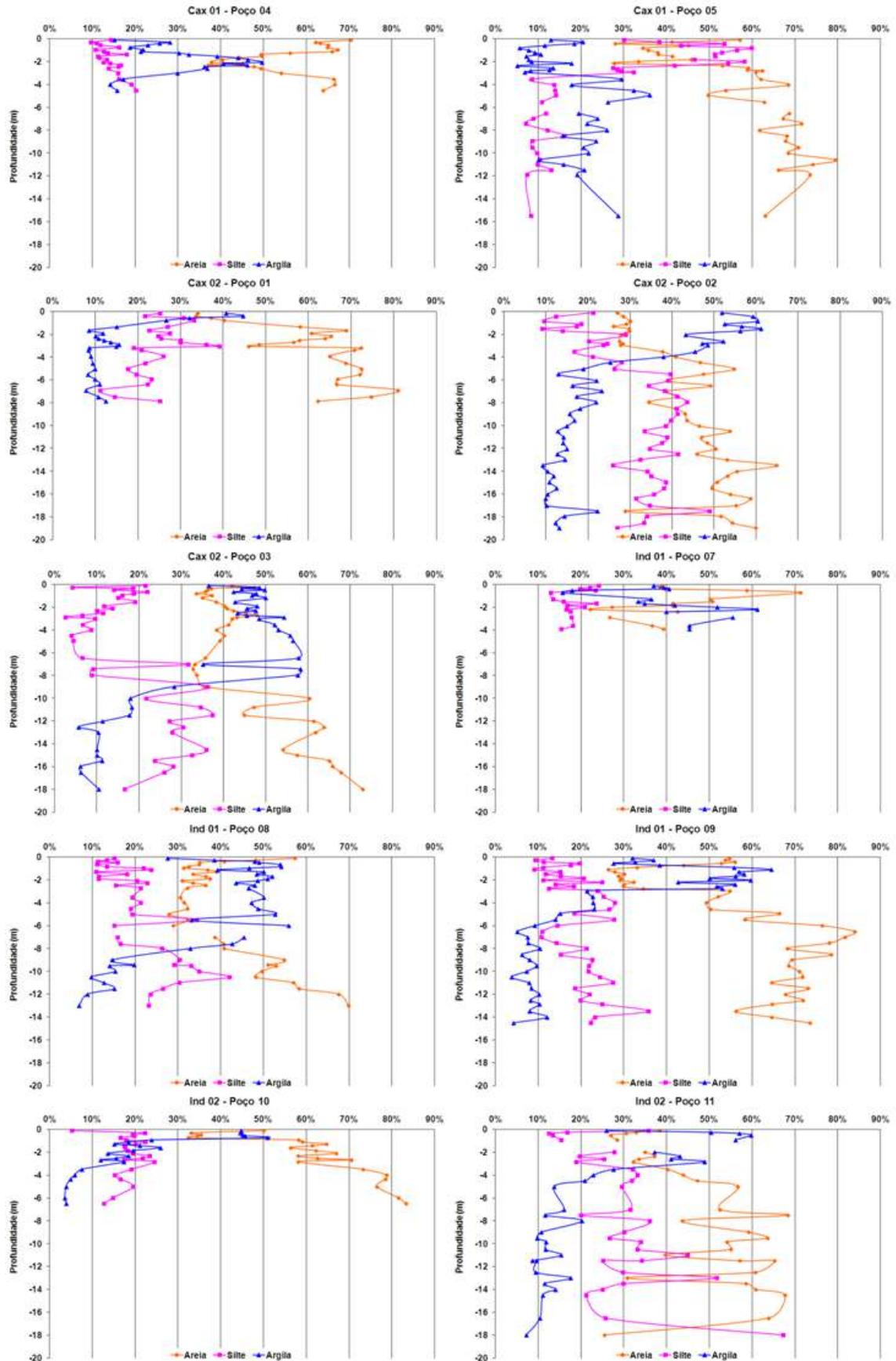


Figura 65 – Granulometria dos poços em relação à profundidade.

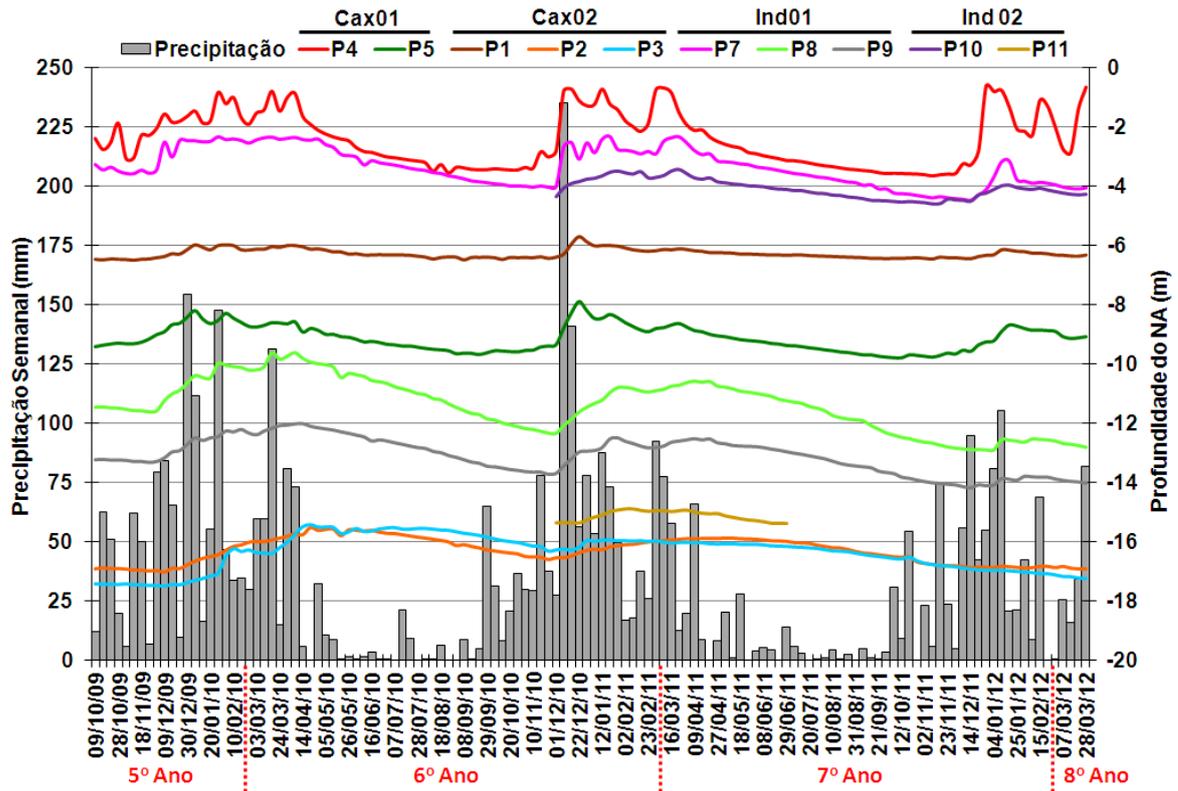


Figura 66 – Oscilação da profundidade do NA em todas as estações. No eixo x (temporal) também está indicada a idade dos plantios de eucalipto.

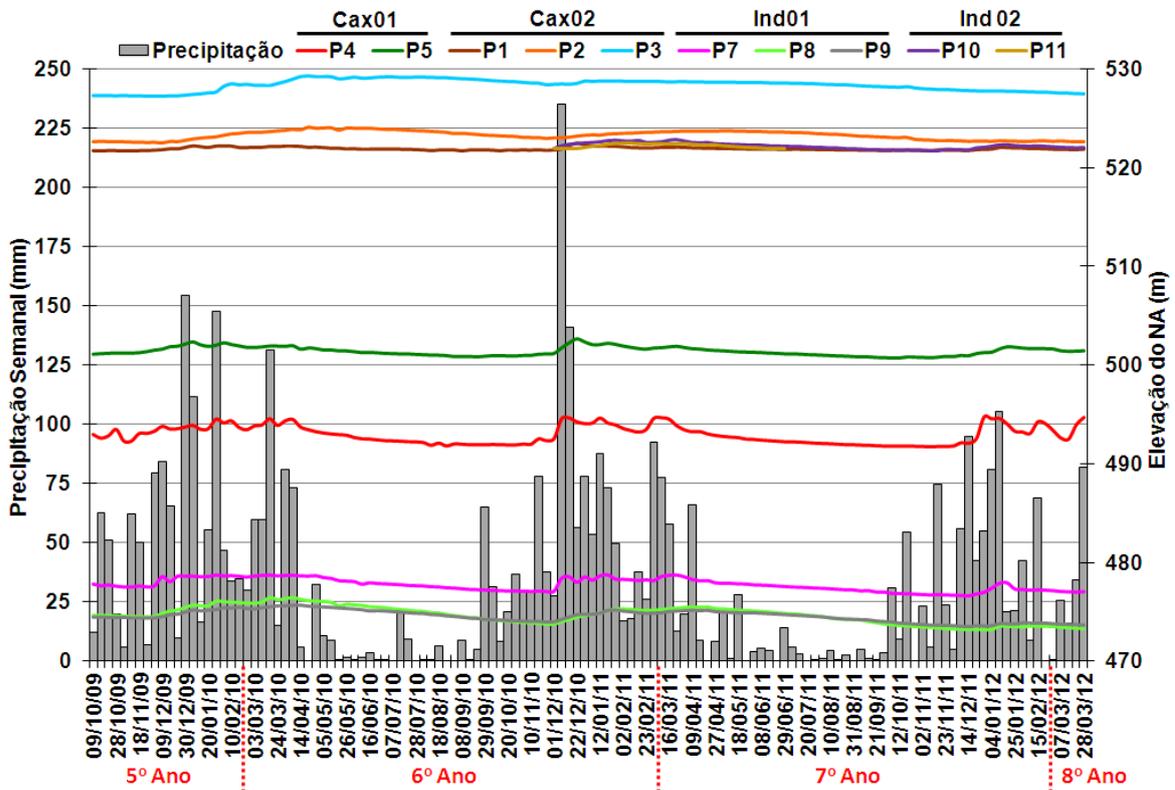


Figura 67 – Oscilação da elevação do NA em todas as estações. No eixo x (temporal) também está indicada a idade dos plantios de eucalipto.

Tabela 16 – Profundidade do NA nos poços por estação.

Estações	Cax 02		Cax 01			Ind 01			Ind 02	
	P4	P5	P1	P2	P3	P7	P8	P9	P10	P11
NA <sub>MÉD</sub> (m)	-1,90	-8,64	-6,27	-16,29	-16,35	-3,36	-11,39	-13,07	-4,08	-15,13
NA <sub>MAX</sub> (m)	-0,10	-7,39	-5,71	-15,52	-15,42	-2,34	-9,62	-11,99	-3,44	-14,89
NA <sub>MIN</sub> (m)	-3,13	-9,31	-6,48	-17,01	-17,48	-4,48	-12,90	-14,16	-4,58	-15,39
$\Delta$ NA (m)	-3,03	-1,92	-0,77	-1,49	-2,06	-2,14	-3,28	-2,17	-1,14	-0,50
DP (m)	0,9	0,4	0,2	0,4	0,6	0,6	0,9	0,6	0,3	0,2
CV (%)	38,7	4,8	2,4	2,6	3,7	19,1	7,9	4,6	7,9	1,2

Observou-se também que em todos os anos uma reversão da tendência de queda do NA a partir do mês de dezembro, sendo que a duração desta recarga da zona saturada variou entre os anos. A reversão desta tendência de queda é simultânea em todos os poços, independente da profundidade e elevação dos mesmos (Figura 68). Esta tendência de subida do NA é logo em seguida revertida novamente, passando a vigorar um período de queda lenta e longa do NA (Figura 68). O comportamento do rebaixamento do NA contrasta com o de subida, sendo este último mais rápido e curto, conforme observado na Figura 69. Os resultados do NA de poços e piezômetros de Leal (2009) e de piezômetros de Avelar e Coelho Netto (1982b) e Fonseca (2006) também apontam para comportamento similar a este.

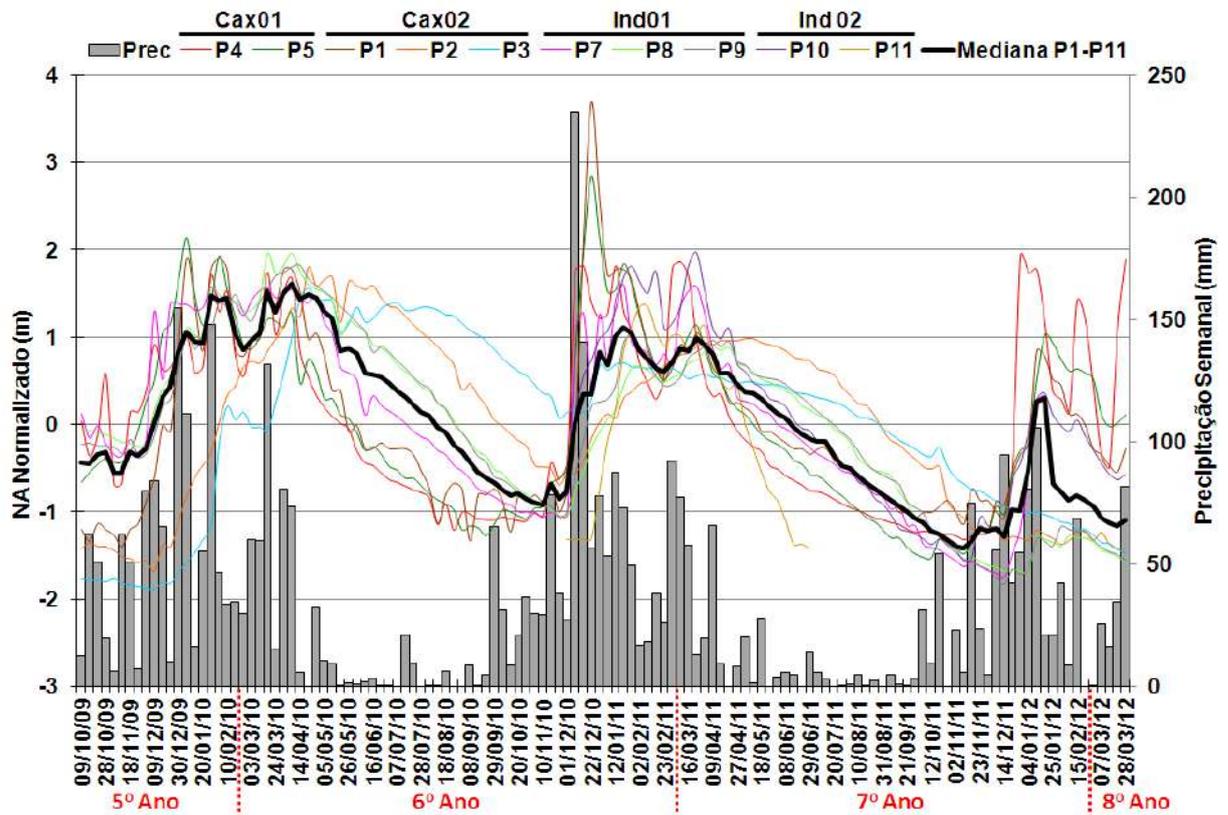


Figura 68 – Oscilação da profundidade do NA normalizado em todas as estações com a indicação da mediana. No eixo x (temporal) também está indicada a idade dos plantios de eucalipto.

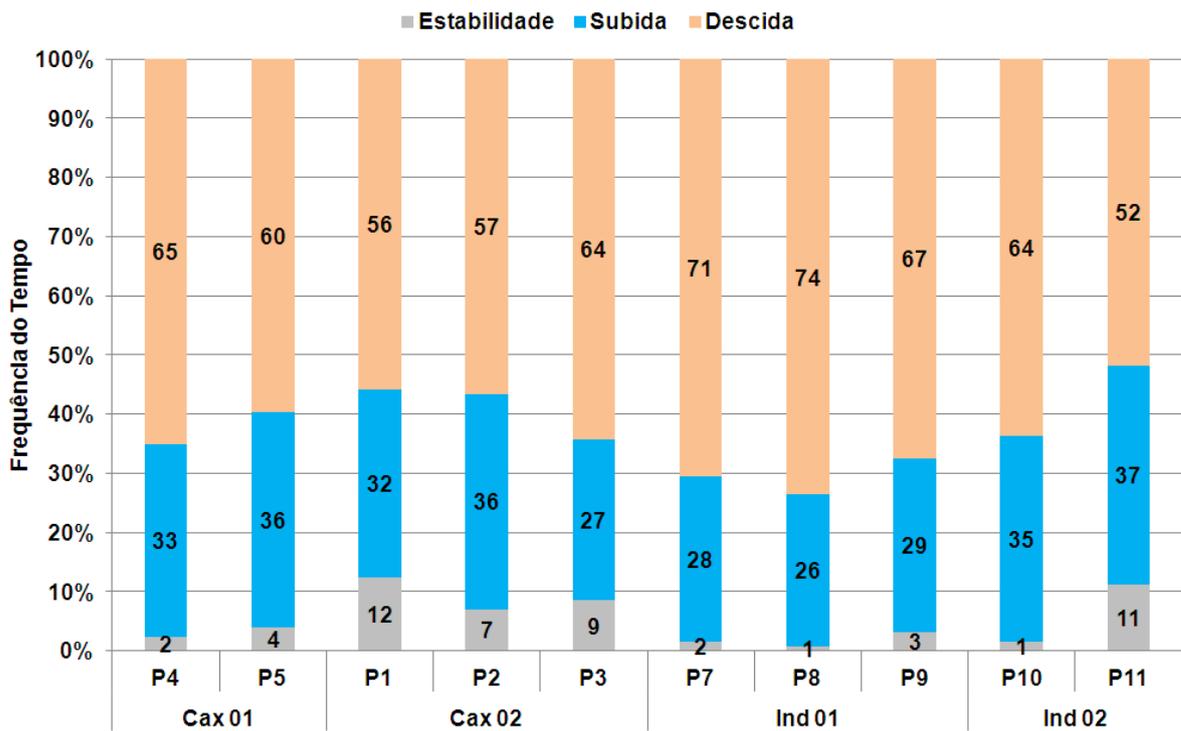


Figura 69 – Indicação da duração total dos períodos de estabilidade, subida e descida do NA a partir de comparações semanais.

Um comportamento diferenciado neste aspecto da subida geral do NA ocorreu no período 2011-2012, em as oscilações positivas foram marcadamente menores do que nos anos 2009-2010 e 2010-2011. Esta diferença se deve aos menores índices de chuva (média das estações pluviométricas Sesmaria, São João, Monte Alegre, Formoso, Feio e Barra) acumulados no período de setembro a março (período chuvoso) de 2011-2012 em relação ao mesmo período de 2009-2010 e 2010-2011 (Figura 70). No período setembro 2011 - março 2012 também ocorreram menos dias chuvosos em praticamente todas as classes de precipitação diária (Figura 71). É relevante observar que no período setembro 2011 - março 2012 a tendência de recarga foi menos acentuada em todos os poços, enquanto nos poços P2 e P3 a tendência de queda nem sequer foi rompida, apesar de apresentarem uma redução na taxa de queda.

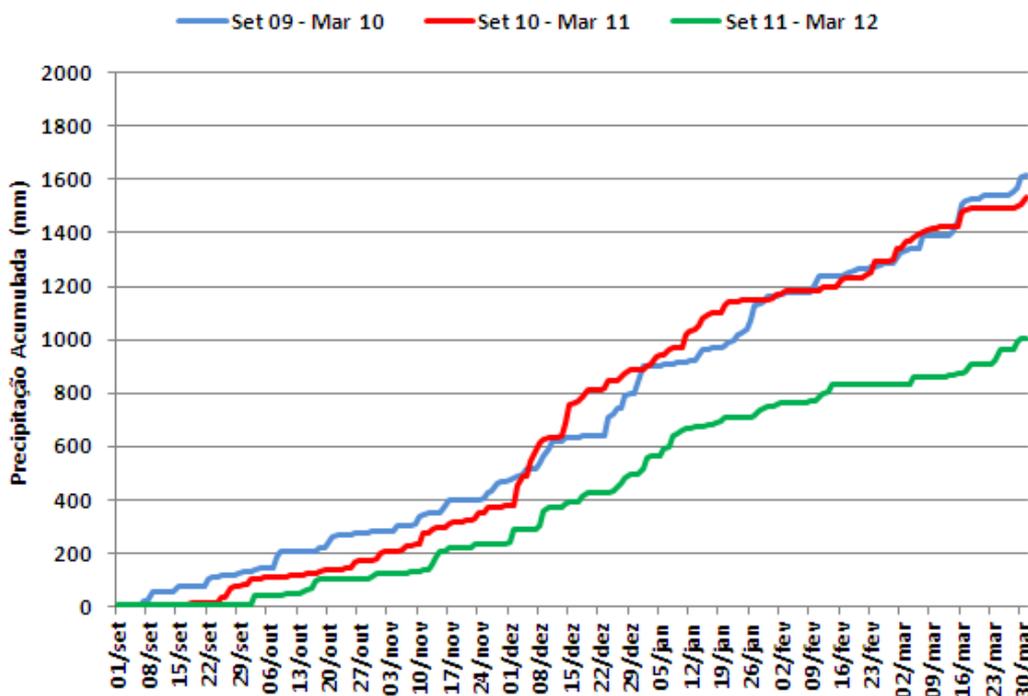


Figura 70 – Precipitação acumulada no período dos meses de setembro a março dos anos 2009-2010, 2010-2011 e 2011-2012.

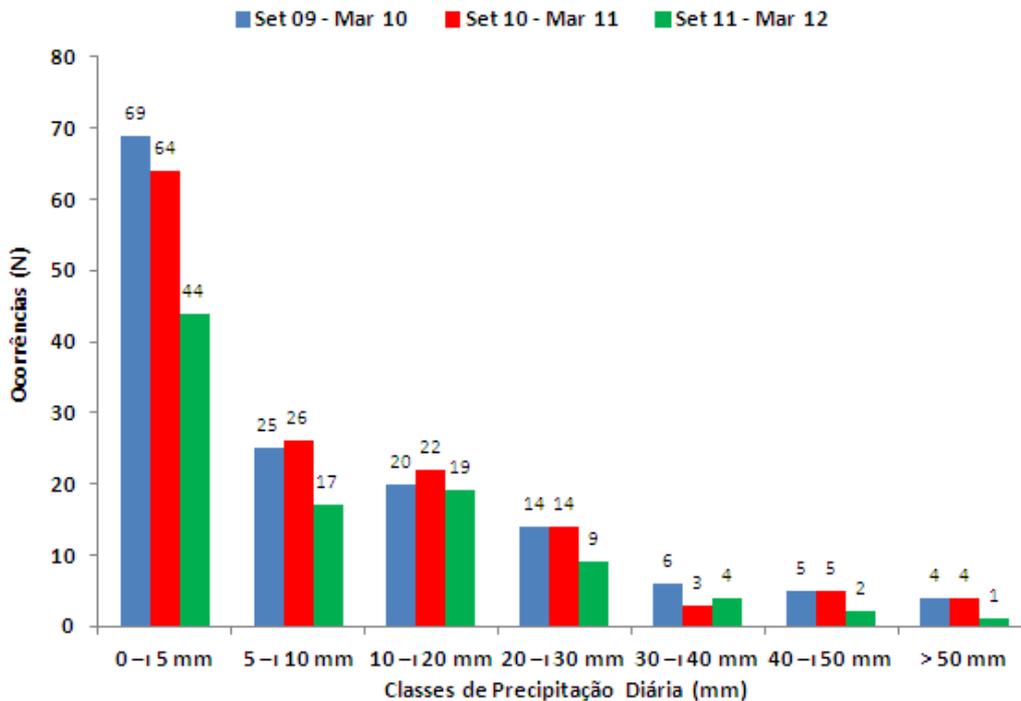


Figura 71 – Distribuição da precipitação diária em classes por período.

Além da precipitação acumulada no período chuvoso ser de fundamental importância para o entendimento da subida do NA, verifica-se também que as chuvas

de maior volume também apresentam papel fundamental na recarga da zona saturada. Esta recarga é detectada com bastante rapidez nos fundos de vale onde a profundidade do NA é menor. Como exemplo, no P4 foi detectada uma subida do NA superior a 2 m e no P7 superior a 1 m na semana do dia 08/12/2010 em que o acumulado foi de 235 mm (Tabela 17). Na Figura 72 é possível observar que nesta semana ocorreu a maior subida de toda a série de dados e que outras semanas com elevados valores de precipitação também proporcionaram expressivas variações positivas do NA.

Tabela 17 – Variação semanal do NA dos poços (m) para acumulados semanais maiores que 100 mm. S.D.: sem dados. Obs.: o P11 apresentou-se sem dados por ter uma série histórica curta e que não coincidiu com os eventos de precipitação superiores a 100 mm.

Precipitação Data	Cax 02		Cax 01			Ind 01			Ind 02	
	P4	P5	P1	P2	P3	P7	P8	P9	P10	P11
154 mm 30/12/2009	0,17	0,22	0,15	0,13	0,07	0,00	0,25	0,22	S.D.	S.D.
111 mm 06/01/2010	0,17	0,22	0,15	0,13	0,08	0,00	0,25	0,22	S.D.	S.D.
148 mm 27/01/2010	0,96	0,11	0,14	0,06	0,09	0,15	0,49	0,04	S.D.	S.D.
131 mm 17/03/2010	0,62	0,09	0,08	0,06	-0,02	0,02	0,47	0,09	S.D.	S.D.
235 mm 08/12/2010	2,03	0,57	0,10	0,00	0,03	1,34	0,27	0,25	0,29	S.D.
141 mm 15/12/2010	0,06	0,52	0,33	0,06	-0,03	0,14	0,20	0,24	0,15	S.D.
106 mm 11/01/2012	0,04	0,32	0,16	0,05	0,01	0,51	0,35	0,21	0,12	S.D.

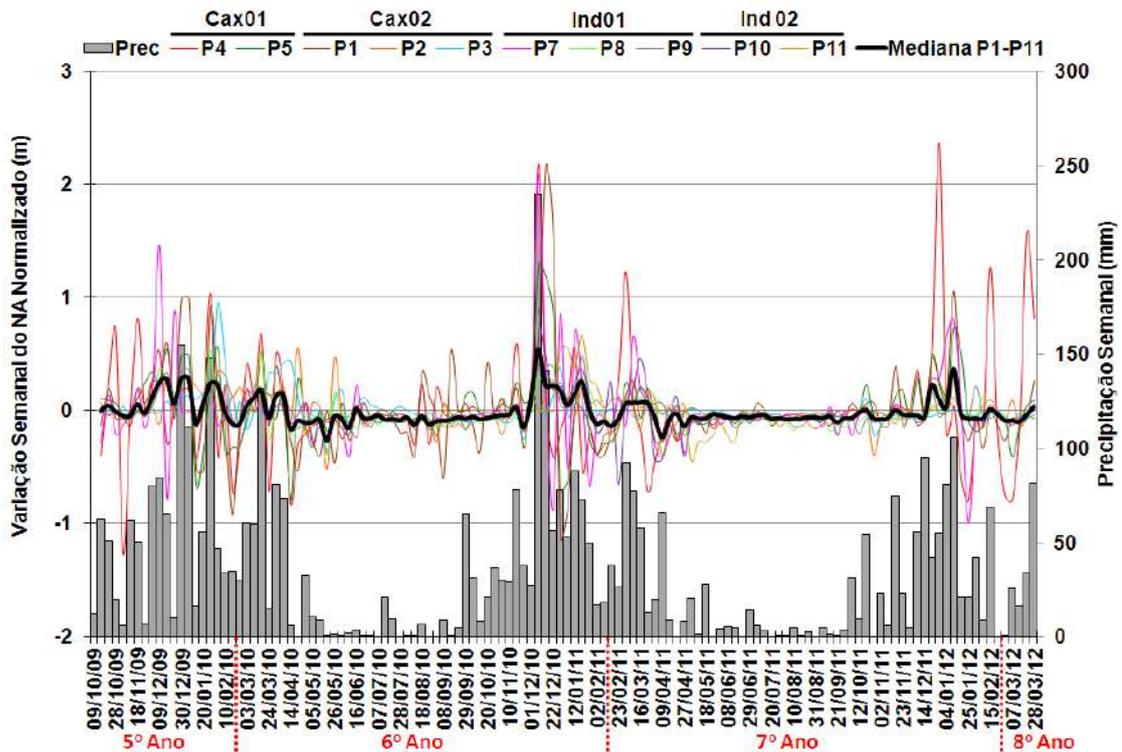


Figura 72 – Variação semanal do NA normalizado em relação à precipitação semanal.

O sincronismo da ascensão do NA em todos os poços, independente da profundidade de todos os mesmos, associado a menor flutuação do NA nos poços mais elevados, sugerem fortemente que a maior parte da recarga da zona saturada destas cabeceiras de drenagem esteja sendo realizada por artesianismo, muito provavelmente pelo sistema de fraturas das rochas encontradas nesta região. Se a recarga do NA nestas cabeceiras de drenagem ocorresse principalmente em virtude de fluxos descendentes, seria esperado que a recarga ocorresse primeiramente nas porções mais rasas do solo e só posteriormente nos pontos mais profundos, em virtude do tempo de percolação da água no perfil do solo. Avelar e Coelho Netto (1992b), Fonseca (2006) e Leal (2009) já haviam detectado elevações rápidas da carga piezométrica e do NA em suas respectivas áreas de trabalho na bacia do rio Bananal, relacionando este artesianismo com a rede de fraturas subverticais, por onde a água poderia ascender. Pela primeira vez, este comportamento regional fica bem caracterizado, a partir do monitoramento simultâneo de quatro cabeceiras de drenagem separadas por até 4,5 Km de distância.

Outra constatação é o fato da recarga da zona saturada estar fortemente relacionada com o acumulado de chuvas dos últimos 120 dias (Figura 73), especialmente para os períodos mais chuvosos (setembro a março de 2009-2010 e

2010-2011). A análise da série de dados de dezembro 2011 - março 2012 indicou que os coeficientes de correlação não atingem os mesmos valores que nos períodos com antecedente mais úmido, pois nos períodos chuvosos com menores acumulados de chuva a recarga, além de ser menor, conforme apontado anteriormente, também apresenta baixa correlação com precipitação acumulada. Pode-se associar esta diferenciação dos períodos com menores acumulados de chuva com o fato da cobertura vegetal de eucalipto e nativa da bacia hidrográfica como um todo atuar com uma evapotranspiração menor que a potencial, absorvendo eficientemente a água que eventualmente chega ao solo. Nos períodos chuvosos em que a precipitação acumulada é superior à média histórica (períodos 2009-2010 e 2010-2011), ocorre um excedente hídrico (precipitação – evapotranspiração potencial), o que se traduz em uma maior correlação entre os volumes precipitados e a oscilação do NA. Zhang *et al.* (2001) indicaram que em regiões úmidas a evapotranspiração não é limitada pela precipitação e sim pela radiação solar (energia).

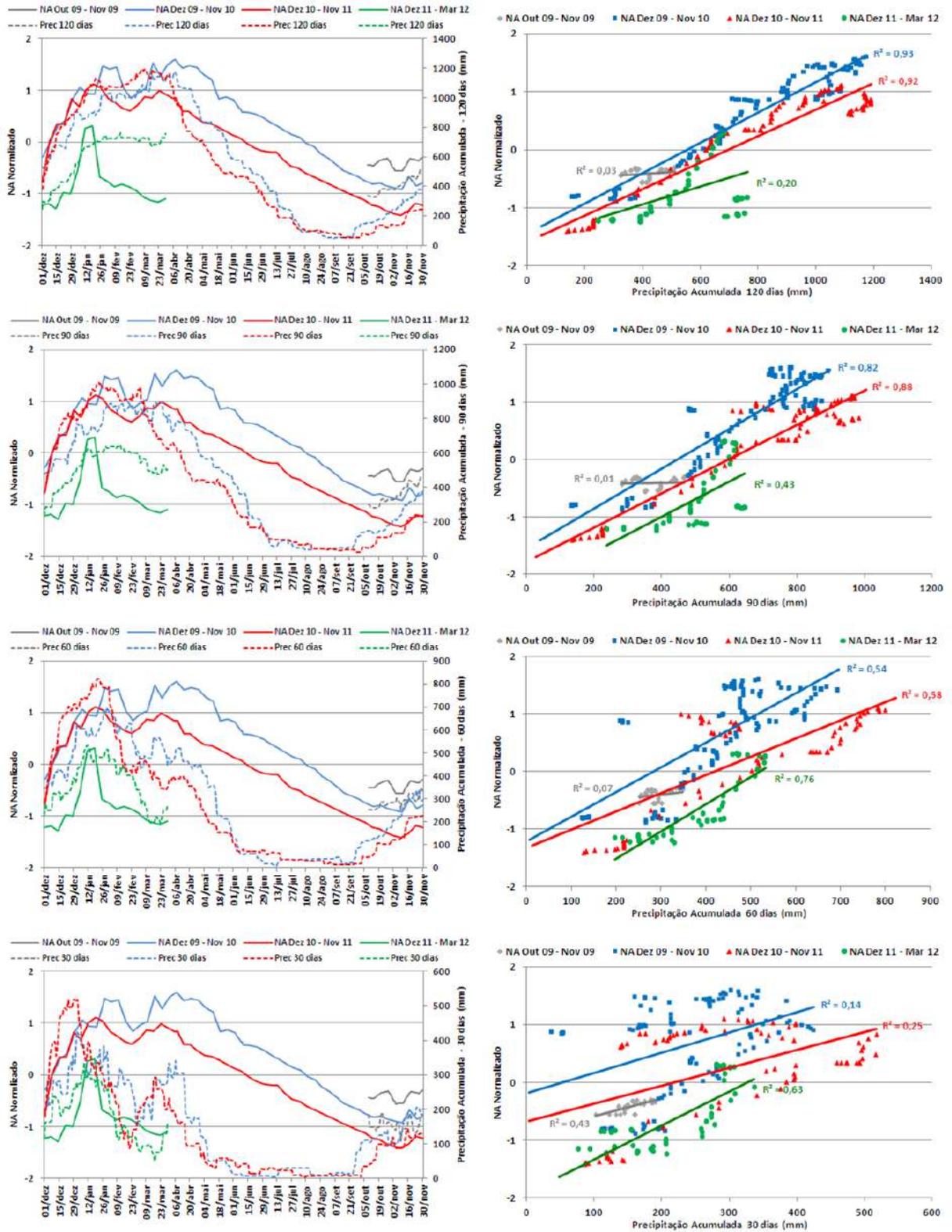


Figura 73 – Esq.: Relação da mediana do NA normalizado (P1 ao P11) com a precipitação acumulada de 30, 60, 90 e 120 dias. Dir.: correlação entre dos períodos de subida do NA em relação à precipitação acumulada de 30, 60, 90 e 120 dias.

Sobre a relação o tempo de resposta do NA de poços e piezômetros em relação à chuva antecedente, Leal (2009) não conseguiu identificar um padrão, com atrasos que segundo o autor variavam de menos de um mês a até mais de um ano. Fonseca (2006) relacionou as variações da carga piezométrica com o antecedente de 90 dias. Primeiramente, cabe ressaltar as que a reversão da tendência de queda da carga piezométrica na fazenda Três Barras no estudo de Fonseca (2006) ocorreu geralmente em dezembro (similar ao presente estudo), enquanto na fazenda Bela Vista o momento que marca o início do período de subida do NA foi mais atrasado (geralmente em janeiro). Esta diferença de atraso entre a área de estudo da fazenda Três Barras e Bela Vista pode estar relacionada com variações geológicas e de gradiente hidráulico em relação ao domínio montanhoso da bacia do rio Bananal. A área de estudo da Bela Vista está assentada sobre um gnaisse de bandas feldspáticas, quartzosas e biotíticas com uma densidade de fraturas superior à área da Bela Vista, que se localiza sobre uma unidade geológica de muscovita-biotita-hornblenda gnaisse com granada (AVELAR e COELHO NETTO, 1992a), conforme visualizado na Tabela 18. Embora o período de monitoramento de Avelar e Coelho Netto (1992b) na área de estudo Bom Jardim tenha sido inferior a um ano e com presença de um período chuvoso com índices abaixo da média, observou-se uma resposta de subida repentina da carga piezométrica somente no mês de fevereiro, sendo esta mais atrasada em relação às outras áreas, correspondendo também com a menor densidade e comprimento de fraturas dentre as áreas avaliadas, pelo fato de estar situada sobre um granitóide.

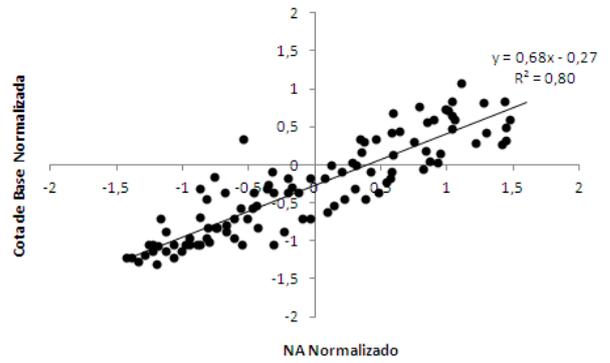
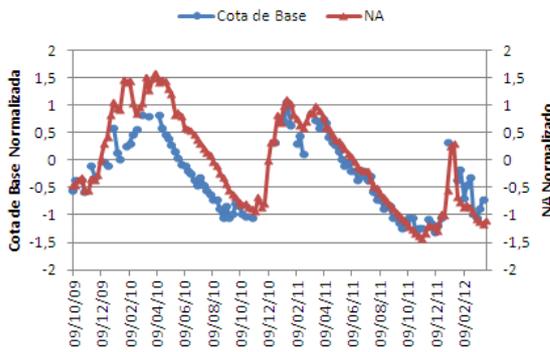
Os poços analisados no presente estudo estão todos sobre as rochas metassedimentares do Complexo Embu e apresentaram respostas sincrônicas de oscilação do NA, apesar de ocorrerem diferenças na magnitude das variações em função da altimetria, conforme reportado anteriormente. Estes resultados apontam para uma diferenciação do padrão de resposta da zona saturada em função da litologia (variação temporal), assim como pela relação altimétrica (amplitude da variação).

Tabela 18 – Orientação de canais e orientação, densidade e comprimento de fraturas nas áreas de estudo Bela Vista, Três Barras e Bom Jardim (extraído de AVELAR e COELHO NETTO, 1992a).

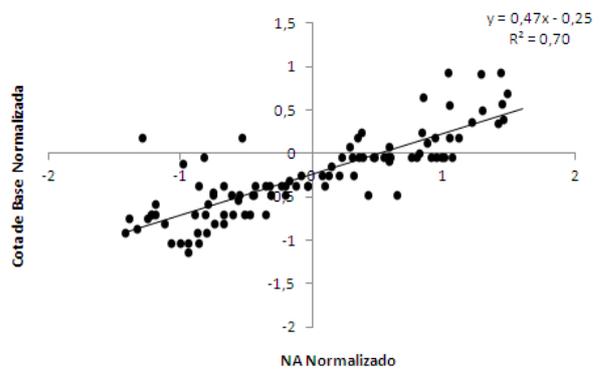
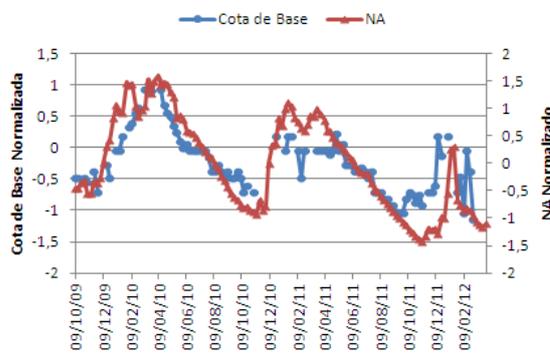
TABELA DE VALORES MÉDIOS				
Área	Orientação dos canais	Direção das fraturas	Densidade de Nº de fraturas. $10^{-6}$	Densidade de comprimento de fraturas. $40^{-6}$ (cm/cm <sup>2</sup> )
Bela Vista	116° n = 27 s = 46°	114° n = 78 s = 43°	0,760 n = 18 s = 0,780	0,020 n = 18 s = 0,030
Três Barras	99° n = 40 s = 59°	119° n = 151 s = 47°	1,820 n = 19 s = 1,460	0,050 n = 19 s = 0,040
Bom Jardim	110° n = 45 s = 40°	104° n = 32 s = 58°	0,140 n = 24 s = 0,140	0,010 n = 24 s = 0,010

Enquanto a subida do NA apresentou-se altamente correlacionada com a precipitação acumulada de 120 dias, a descida estava relacionada com o fluxo de base dos rios principais. A relação do NA com o fluxo de base foi bastante ajustada ao longo de todo o período, em especial aos rios Sesmaria, São João e Formoso, conforme observado na Figura 74. Foi observada uma baixa correlação entre o NA dos poços e a cota linimétrica dos rios somente com o rio Formoso. Isto se deu principalmente em função da grande alteração morfológica do canal fluvial no local onde estavam instaladas as réguas de medição, em razão da ocorrência de uma chuva de grande volume do dia 14 de março de 2010 na região montanhosa da bacia do rio Sesmaria (estação Barra = 81,6 mm). A grande energia do fluxo e a elevada cota atingida pelo rio Feio foram responsáveis pela destruição da seção de réguas linimétricas e também atingiu o local onde estavam posicionados os pluviômetros artesanais (Figura 75). As cotas linimétricas da estação Feio apresentaram baixo coeficiente de correlação com todas as demais estações, por isso não puderam ser estimadas.

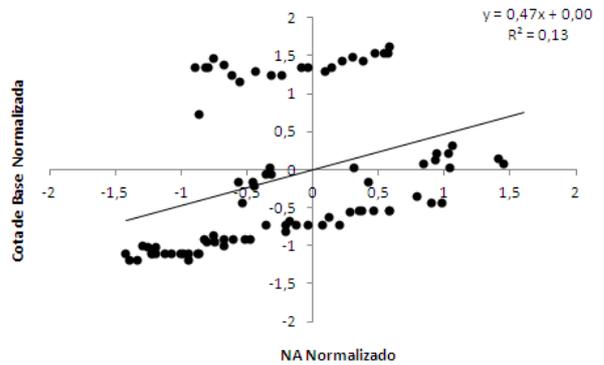
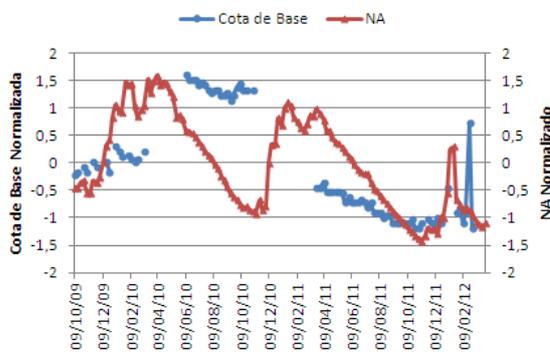
### Rio Sesmaria



### Rio São João



### Rio Feio



### Rio Formoso

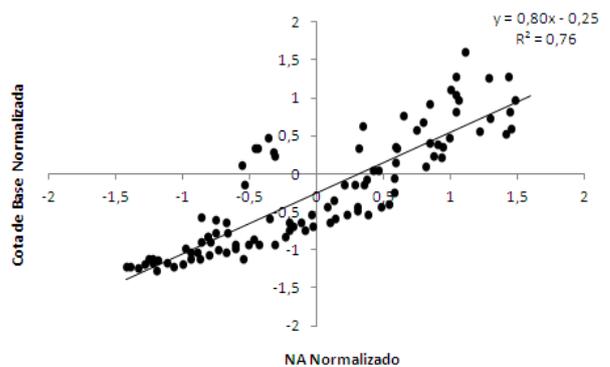
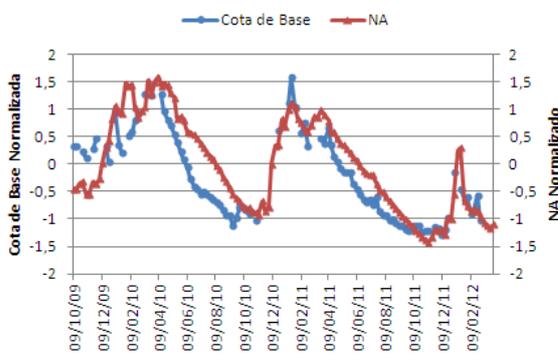


Figura 74 – Relação do NA dos poços e a cota dos rios em fluxo de base.



Figura 75 – Morfologia no local da estação rio Feio. Esq.: antes do dia 15 de março de 2010 (13/07/2008). Dir.: após o dia 15 de março de 2010 (24/03/2010). Notar a erosão das margens e a deposição de sedimentos grosseiros. A seta vermelha indica aproximadamente a elevação onde estavam instalados os pluviômetros, que foram arrastados pelo fluxo. Como escala, à esquerda da seta há uma caminhonete.

Cabe ressaltar ainda o importante papel desempenhado pelos principais rios como referências de nível para o deslocamento da água subterrânea. Nesta estação foi observada uma inversão do gradiente hidráulico observado nas demais estações monitoradas, que geralmente indicava uma mais alta elevação do NA nas encostas e um NA mais baixo nos fundos de vale, o que se traduz no direcionamento dos fluxos d'água das encostas em direção aos fundos de vale. No entanto, na estação Independência 01 a elevação do NA no P7 (fundo de vale) sempre foi superior à elevação do NA em P8 e P9 (baixa-média encosta), sendo esta diferença de no mínimo 2,5 metros e máxima de 4,3 metros (Figura 76). Esta diferença de elevação do NA entre o poço P7 e os poços P8 e P9 indica a ocorrência de um desnivelamento do NA em sentido à encosta, na direção do rio Formoso. O exutório da estação Independência 01 estava localizada apenas 80 metros de distância do rio Formoso. Embora não existam outros pontos de mensuração da zona saturada após o divisor topográfico da cabeceira de drenagem, é bastante plausível que ocorra a pirataria da água subterrânea entre o vale da cabeceira de drenagem da estação Independência 01 e o vale do rio Formoso. Leal (2009) já indicou esta ocorrência entre vales de cabeceiras adjacentes na bacia do rio Piracema, em que uma voçoroca que se desenvolveu a partir do rio Piracema pirateava a água subterrânea de áreas adjacentes. Esta possível pirataria é um argumento para justificar o fato da estação Independência 01 ser a que se apresenta por mais tempo sem nenhum tipo de fluxo superficial.

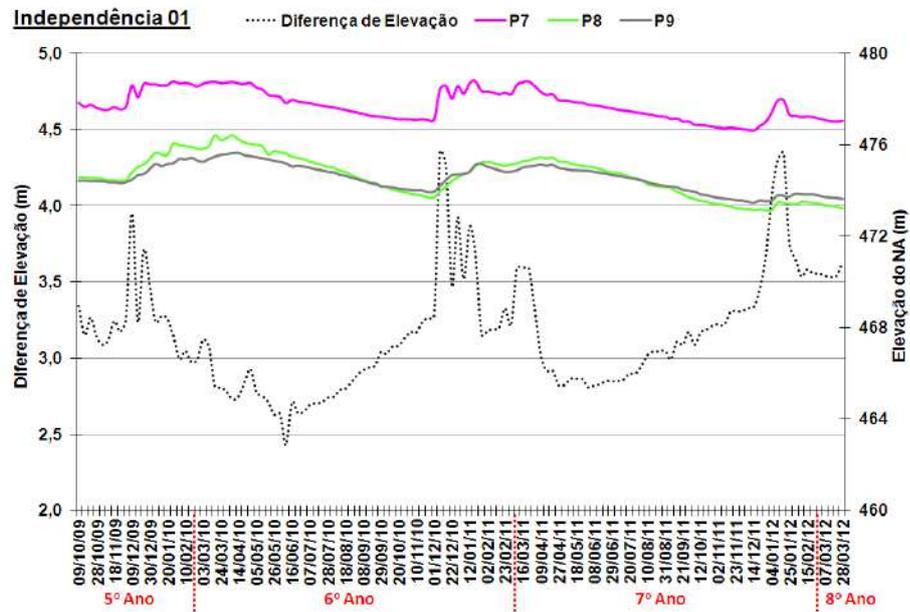


Figura 76 – Variação da elevação do NA nos poços P7 (fundo de vale) e P8 e P9 (encosta). A linha de diferença de elevação foi calculada a partir da diferença de elevação de P7 em relação à média de P8 e P9.



Figura 77 – Estação Independência 01 com a localização dos poços P7 (fundo de vale), P8 e P9 (encosta) e indicação do desnívelamento do NA no sentido do canal do rio Formoso.

Sabe-se que o fluxo de base dos rios está diretamente relacionado com o NA, uma vez que é a água subterrânea que abastece esse fluxo nos canais fluviais. A partir da observação da estreita relação entre a precipitação acumulada de 120 dias

com a elevação do NA e o constante acompanhamento do NA dos poços nas cabeceiras de drenagem com as cotas de base dos principais rios, reforça-se a concepção de que exista uma variação regional sincrônica do NA. Estes dados também demonstram uma relação bidirecional entre o fluxo de base e o NA que se altera ao longo do ano. Durante o período de ascensão do NA é o aquífero que influencia com maior intensidade o fluxo de base (NA → fluxo de base), enquanto no período de descida do NA é o fluxo de base que influencia mais fortemente o NA (NA ← fluxo de base), muito embora eles sejam mutuamente relacionados ao longo de todo o ano, apenas com variações de intensidade.

O que reforça esta hipótese é o fato do NA estar muito abaixo da zona de raízes nas encostas (profundidades geralmente > 10 m) tanto da vegetação nativa (mata Atlântica) quanto dos eucaliptos, lembrando que a ampla revisão de 290 artigos feita por Canadell *et al.* (1996) sobre a profundidade máxima de sistemas radiculares de árvores indica um valor médio de sete metros. Sendo assim, nas encostas a vegetação poderia influenciar no volume de água destinado à recarga da zona saturada e não sua retirada, uma vez que o lençol freático encontra-se geralmente abaixo da profundidade máxima das raízes. Deve-se considerar também o fato dos poços instalados estarem na baixa-média encosta, e que existe uma tendência de aumento da distância entre a zona de raízes e o lençol freático à medida que se sobe na encosta.

Os efeitos de uma franja capilar poderiam ser alegados, mas os resultados de granulometria indicam que a fração areia é preponderante abaixo dos oito metros, além do fato da própria fração argila apresentar comportamento de areia por estar altamente agregada, conforme indicado por Mulato *et al.* (2009) a partir de análises granulométricas de solo da estação Bela Vista, bacia do rio Bananal. Por outro lado, a observação de raízes no interior do P4 indicando que a vegetação pode atuar como freatófita poderia contrapor esta concepção de que é o fluxo de base o maior responsável pelo o rebaixamento do lençol freático, mas vale ressaltar que cerca de 63% da bacia do rio Sesmaria era coberto por gramíneas em 2006 e que os fragmentos de floresta Atlântica respondiam por 31%, estando bastante dispersos em pequenas manchas no domínio de colinas e de forma mais contínua no domínio montanhoso (VIANNA *et al.*, 2007). As gramíneas (gênero *Brachiaria*) estudadas na bacia do rio Bananal indicavam que a maior concentração de biomassa de raízes estava nos primeiros 40 cm (CAMBRA e COELHO NETTO, 1998).

As observações de campo feitas a partir de 2006 na bacia do rio Sesmaria permitem afirmar que pouco mudou na composição e estrutura da paisagem<sup>12</sup> desta bacia até o presente momento. Sendo assim, no domínio geomorfológico do MVRPS de colinas convexo-côncavas, a atuação da vegetação arbórea absorvendo diretamente a água da zona saturada deve estar restrita a uma pequena parcela da área total da bacia, mais especificamente nas áreas de fundo de vale marginais aos canais de drenagem.

#### 6.4 EVOLUÇÃO DE VOÇOROCAS

As análises realizadas a partir das imagens de satélite (anos 2003 e 2010) e fotografias aéreas (2004) permitiram concluir que:

- Ano de 2003 (imagem Ikonos): a Voçoroca 01 encontrava-se estabilizada (presença de vegetação e ausência de solo exposto); a Voçoroca 02 encontrava-se ativa e a cabeça do canal estava restrita ao fundo de vale, com exceção de um dos dígitos (D1) que já se encontrava na encosta (Figura 78). A visualização geral da área permitiu identificar a exportação de sedimentos (seta vermelha da Figura 79).

---

<sup>12</sup> A composição de uma paisagem está relacionada com os elementos passíveis de identificação (ex: pastagens, plantios, floresta, etc.), enquanto a estrutura de uma paisagem está associada com a distribuição espacial destes elementos. Segundo Turner (2001), ambas (composição e estrutura) podem ser alteradas em função da escala de análise.

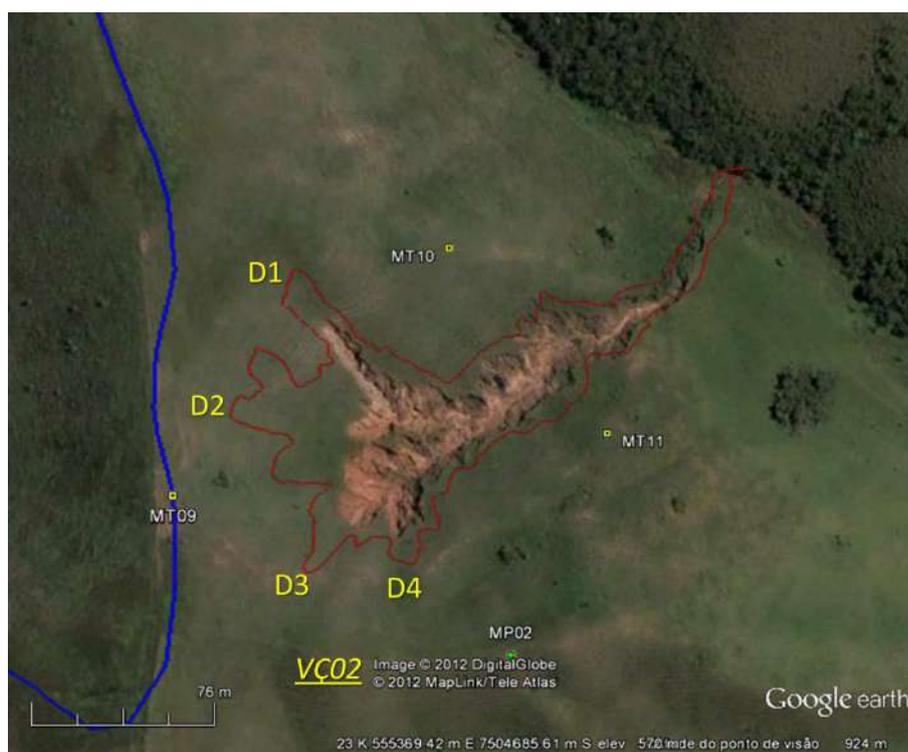
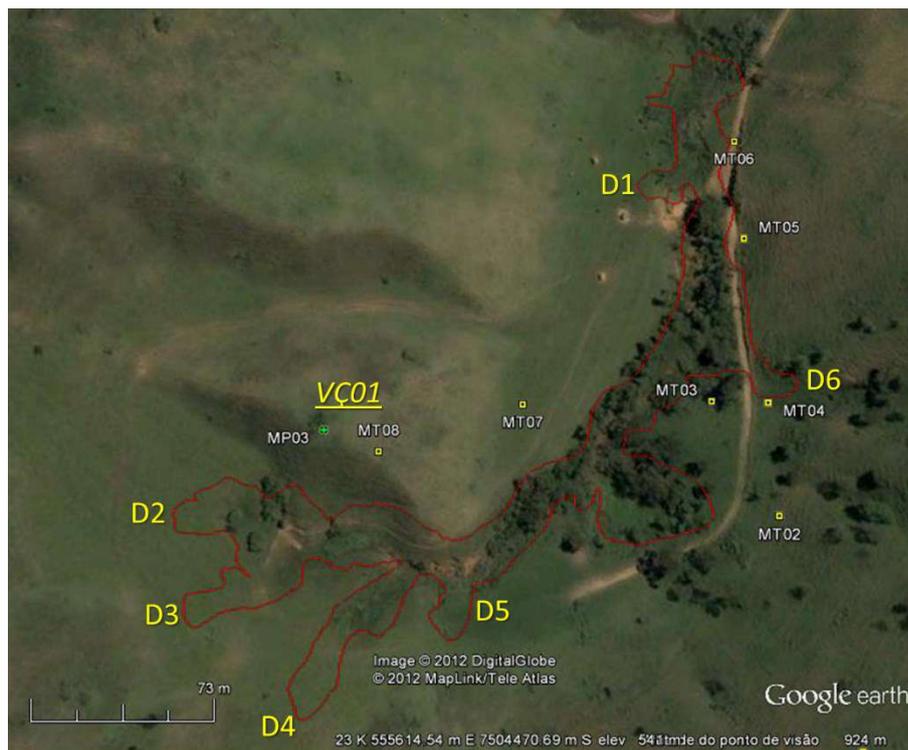


Figura 78 – Situação da Voçoroca 01 (acima) e Voçoroca 02 (abaixo) no dia 07/02/2003. A linha vermelha delimita o contorno das voçorocas em 2012.



Figura 79 – Visualização geral da área de interesse em 07/02/2003. A seta vermelha indica a exportação de sedimentos.

- Ano de 2004 (fotografia aérea): é possível observar os plantios de eucalipto em seu estágio inicial (áreas em cores claras no lado esquerdo da Figura 81). A Voçoroca 01 apresentava os primeiros sinais de reativação. Devido à qualidade da imagem, fica ainda mais nítido a pré-existência da morfologia de um canal na área de ocorrência da voçoroca, mas com bordas convexas, um indicador de estabilidade; a Voçoroca 02 permanecia ativa e a cabeça do canal ainda estava restrita ao fundo de vale, com exceção de um dos dígitos que já se encontrava na encosta, conforme anteriormente indicado na imagem de 2003 (Figura 80). A visualização geral da área permitiu identificar a permanência de exportação de sedimentos (seta vermelha da Figura 81);



Figura 80 – Situação da Voçoroca 01 (esq.) e 02 (dir.) em 2004. O brilho da imagem da Voçoroca 02 foi aumentado devido às áreas de sombra.

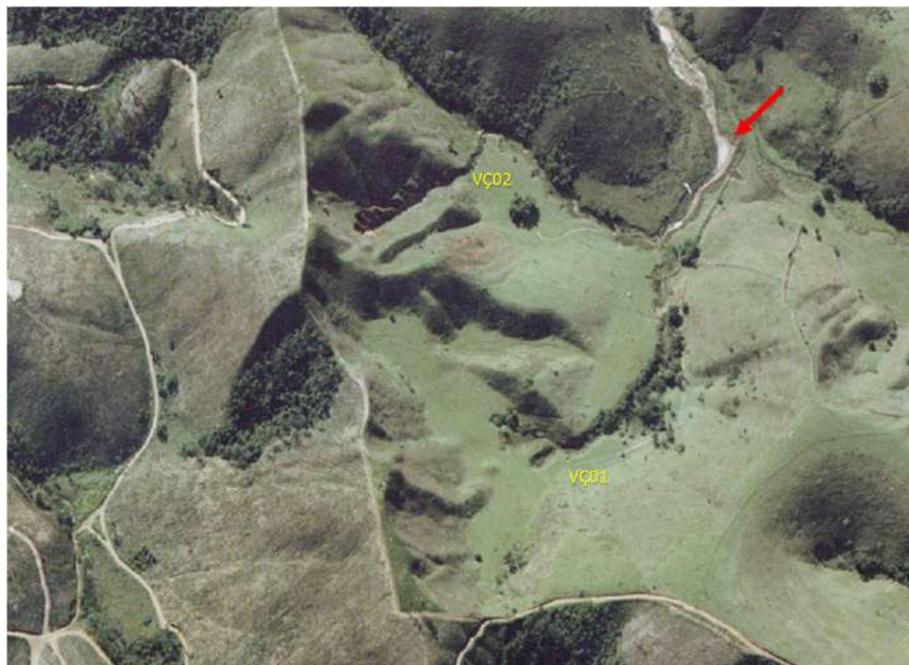


Figura 81 – Visualização geral da área de interesse em 2004, com o início dos plantios de eucalipto no lado esquerdo da imagem. A seta vermelha indica a exportação de sedimentos.

- Ano de 2010 (imagem Geoeye): a Voçoroca 01 mostrava-se plenamente ativa, com expansão lateral e longitudinal, ocasionando supressão da vegetação arbórea em alguns pontos e grande exposição do solo. As bordas apresentavam arestas acentuadas, um indicador de atividade. Observou-se também a formação de sete dígitos, sendo que a maioria destes dígitos se direcionava para as concavidades pré-existentes nas encostas; a Voçoroca 02 permanecia ativa, com grande expansão e a formação de pequenos dígitos, que se expandiram do fundo de vale para as encostas.

O dígito que já era mais alongado em 2006 também sofreu expansão (Figura 82). A Figura 83 mostra a visão de conjunto, com as duas voçorocas apresentando atividade.



Figura 82 – Situação da Voçoroca 01 (esq.) e 02 (dir.) no dia 21/08/2010. A linha vermelha delimita o contorno das voçorocas em 2012.

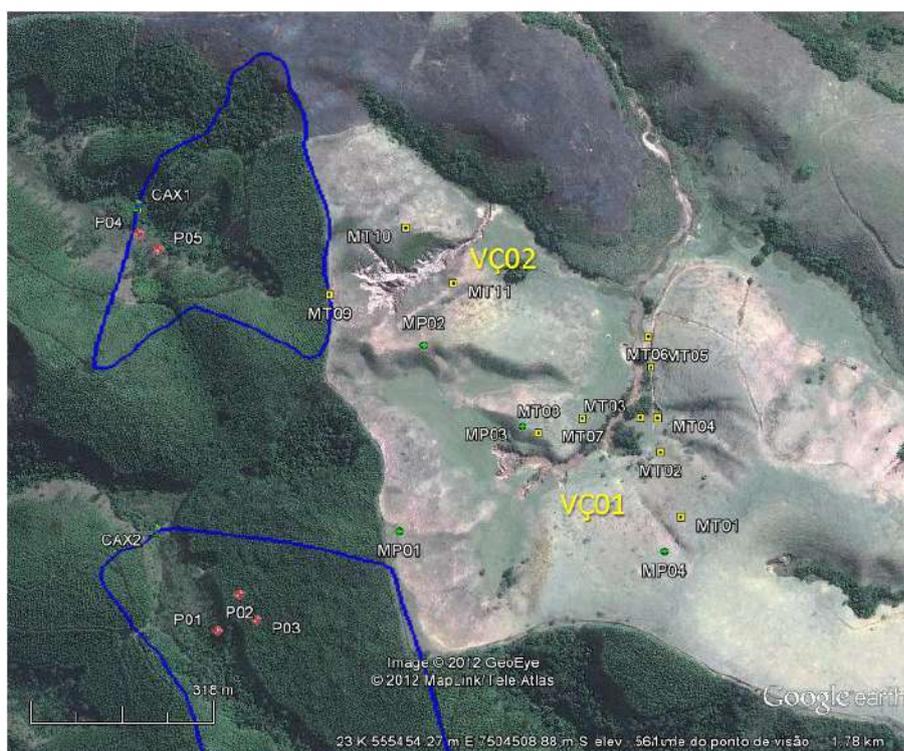


Figura 83 – Visualização geral da área de interesse em 21/08/2010 com plantios de eucalipto no lado esquerdo da imagem.

Através da comparação das imagens de satélite de 2010 com o levantamento realizado em 2012 (a Voçoroca 01 não era identificada na imagem de 2003) observa-se que a Voçoroca 01 apresentou taxas de expansão superiores a 1 m/mês em alguns

dígitos, o que denota uma rápida evolução. Sobre a Voçoroca 02 foi possível realizar a comparação entre dois períodos, uma vez que a voçoroca se encontrava visivelmente ativa em 2003. Os dados apontaram para uma rápida evolução do Dígito 1 entre 2003 e 2010 com uma posterior estagnação da evolução desde 2010. O Dígito 2 indicou uma manutenção da taxa de evolução em torno de 0,4 m/mês nos dois períodos, enquanto os Dígitos 3 e 4 apontaram para uma aceleração da taxa de evolução no período de 2010-2012, sendo que foi 1,7 vezes maior no Dígito 3 e 2,5 vezes maior no Dígito 4 (Tabela 19). Levantamento feito por Bull e Kirkby (1997) sobre a média das taxas de expansão remontante das cabeças das voçorocas em diferentes estudos indicou que estas podem atingir 6 m por ano, sendo as taxas de expansão do presente trabalho superiores ao deste estudo em alguns dos dígitos analisados.

Tabela 19 – Evolução das voçorocas na comparação dos anos de 2003, 2010 e 2012. \* Levantamento da Voçoroca 01 realizado em 10/3/2012 e da Voçoroca 02 em 19/4/2012.

Dígitos	Intervalo (dias)		Evolução (m)		Taxa (m/mês)	
	2003-2010	2010-2012*	2003-2010	2010-2012	2003-2010	2010-2012
<b>Voçoroca 01</b>						
D1	-	567	-	2,43	-	0,13
D2	-	567	-	19,10	-	1,01
D3	-	567	-	21,24	-	1,12
D4	-	567	-	22,13	-	1,17
D5	-	567	-	3,75	-	0,20
D6	-	567	-	6,36	-	0,34
<b>Voçoroca 02</b>						
D1	2.752	607	23,73	0,00	0,26	0,00
D2	2.752	607	45,58	7,60	0,41	0,38
D3	2.752	607	25,29	6,94	0,20	0,34
D4	2.752	607	12,66	4,51	0,09	0,22

Baseado nos dados apresentados, observou-se uma relação temporal entre a implantação dos plantios de eucalipto nas cabeceiras de drenagem adjacentes às voçorocas no ano de 2004 e a ativação da Voçoroca 01 e a manutenção de evolução da Voçoroca 02. Esta relação temporal é mais um indicador que a presença dos plantios de eucalipto altera a dinâmica hidrológica das cabeceiras de drenagem, deixando de ser um ambiente de predomínio de escoamentos superficiais com a presença de pastagem degradada, passando a se comportar como um ambiente de elevada infiltração de água (SATO, 2008) em razão do atravessamento concentrado junto aos troncos (SATO *et al.*, 2011) e da espessa camada de serrapilheira (MELOS *et al.*, 2011). Os resultados desta mudança hidrológica podem estar relacionados com

a reativação dos processos erosivos por voçorocamento nas cabeceiras de drenagem adjacentes aos novos plantios de eucalipto.

As voçorocas atualmente ocupam porções diferenciadas dos vales de cabeceira: a Voçoroca 01 está retrabalhando os depósitos de fundo de vale (Figura 84), ao passo que os dígitos da Voçoroca 02 ocupam as encostas (Figura 85). Os dados indicaram uma evolução mais rápida da Voçoroca 01 em relação à Voçoroca 02. Observações de campo mostram que na Voçoroca 01 ocorre a exfiltração da água subterrânea na cabeça dos canais (dígitos) durante todo o ano (Figura 86).



Figura 84 – Voçoroca 01 retrabalhando os depósitos de fundo de vale (rampas). Ao fundo, observam-se os plantios de eucalipto.



Figura 85 – Dígitos da Voçoroca 02 nas encostas. Visão de montante para jusante.



Figura 86 – Fluxo de água corrente no Dígito 4 da Voçoroca 01. Foto tirada em 12/05/2011 no início do período de estiagem.

Baseado nestes dados e nas observações de campo, formula-se a hipótese de que a evolução da Voçoroca 01 atualmente é mais rápida pelo fato de ocorrer ao longo de todo o ano relacionada com a exfiltração da água subterrânea do aquífero. Provavelmente, esta evolução deve acompanhar as variações do NA do aquífero regional. Conforme indicado na descrição da fotografia de 2004, observam-se os primeiros sinais de ativação da Voçoroca 01 concomitantemente com a implantação dos plantios de eucalipto. O que reforça esta possibilidade de troca de água subterrânea entre vales adjacentes é o fato da elevação do NA em todos os poços da estação Cax02 (elevação média do NA P1= 522 m; P2 = 523 m; P3 = 528 m) estarem suspensos em relação ao fundo da voçoroca 02 ( $\approx$  520 m), mesmo durante a rotação do plantio de eucalipto. De fato, observa-se no dígito 04 (D4), que cresce obliquamente em relação ao divisor topográfico, que existe uma grande diferença entre as paredes da voçoroca de montante e jusante, sendo que na parede a montante ocorrem muitos túneis erosivos (*pipes*), enquanto na parede de jusante estes túneis não são praticamente observados, indicando que os fluxos são oriundos da direção da estação Caximonan 02.

Sobre a evolução dos dígitos da Voçoroca 02, diferentemente da Voçoroca 01 que possui exfiltração constante em seus dígitos, nesta voçoroca a exfiltração somente é observada na porção mais baixa do canal erosivo, a aproximadamente 20

metros da confluência com outro canal de drenagem. Sendo assim, não existem indícios de que a evolução dos dígitos da Voçoroca 02 esteja relacionada com a exfiltração da zona saturada, sendo provavelmente associada à ocorrência de escoamentos subsuperficiais raso durante ou logo após os eventos de chuva. O que reforça esta hipótese é a observação de feições de faces de exfiltração no solo exposto dos dígitos, especialmente na direção da alta encosta, em direção aos plantios de eucalipto (Figura 87).



Figura 87 – Avanço dos dígitos da Voçoroca 02 para a alta encosta. Ao fundo observam-se os plantios de eucalipto.

Observações de campo realizadas na estrada Queluz-Areias (SP-058) no estado de São Paulo indicavam que este processo de erosão por escoamento subsuperficial ocorria abaixo de um plantio de eucalipto em estágio inicial (Figura 88). Um fator que pode contribuir com a ocorrência desses fluxos é a injeção pontual de água na base dos troncos dos eucaliptos (SATO *et al.*, 2011), permitindo uma rápida percolação pelas raízes, que atuam como vias preferenciais de percolação. Sato *et al.* (2011) identificaram valores médios de atravessamento próximo aos troncos de 146% na relação atravessamento/precipitação, chegando ao valor máximo de 567% em um dos dias chuvosos. Esta entrada rápida e concentrada de água associada a descontinuidades hidrológicas no perfil do solo e/ou ocorrência de faces para a

exfiltração da água (cortes de estradas, solo exposto das voçorocas, etc.) poderiam acarretar na exfiltração desta água subsuperficial.



Figura 88 – Feições de erosão por água subsuperficial no corte da estrada Queluz-Areias/SP (SP-058).

Na área de estudo das voçorocas, soma-se ainda o fato da Voçoroca 02 estar na linha de uma dobra antiformal mapeada por Eirado Silva (2006), demonstrando grande controle estrutural da orientação desta voçoroca (Figura 89). As observações de campo indicaram que a foliação das rochas neste ponto são subverticais e alinhadas com o eixo principal da Voçoroca 02 (Figura 90), o que poderia facilitar a passagem de fluxos subterrâneos entre encostas adjacentes.

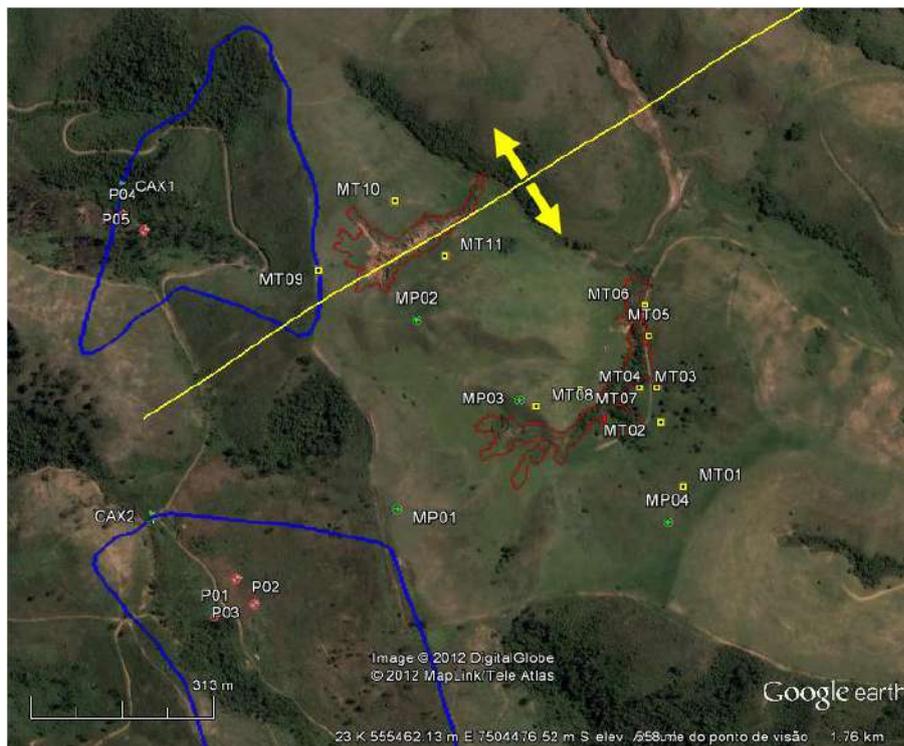


Figura 89 – Alinhamento da Voçoroca 02 com a dobra antiformal (linha amarela com setas) mapeada por Eirado Silva (2006).



Figura 90 – Ocorrência de foliações subverticais com intercalações de bandas de quartzo na alta encosta, acima da Voçoroca 02.

## 6.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA HISTÓRICA

Os resultados referentes às simulações com base nos dados hidrológicos de precipitação e evapotranspiração segundo o modelo Zhang *et al.* (2001) de estão descritos na Tabela 20. Observa-se na comparação da Simulação 01 com a Simulação 02 que ocorreram alterações significativas no balanço hídrico, como a redução da evapotranspiração em -23% (-254 mm), o que alterou a relação Q/P de 30,3% para 46,1%. Pode-se entender que durante o Ciclo do Café eram encontradas condições intermediárias entre a Simulação 01 e Simulação 02, isto por que são descritos valores de Índice de Área Foliar (IAF) da ordem de 3,0 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> para plantios de café (PEREIRA *et al.*, 2011), 1,1 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> para pastagens de *Brachiaria* (MEIRELLES *et al.*, 2011) e entre 6,0 e 7,0 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> em ambientes de floresta ombrófila densa (Almeida e Soares, 2003). Sabe-se que as folhas são os principais órgãos de exportação de água pelos vegetais, sendo os estômatos as estruturas responsáveis pelo controle da evapotranspiração.

Outro ponto está associado à atual tendência de conversão de pastagens por plantios de eucalipto, que foi abrangida pela comparação das Simulações 02 e 03. Observa-se que a atual cobertura de plantios de eucalipto em substituição às pastagens pouco alterou os resultados do balanço hídrico da bacia. Essa mudança de uso e cobertura do solo promoveu um aumento de 11 mm na evapotranspiração média anual, o correspondente a uma variação de + 1,3% na relação ET/P.

Tabela 20 – Balanço hídrico das simulações. Simulação 01: Pré-Ciclo do Café, Simulação 02: Pós-Ciclo do Café, Simulação 03: Condição Atual.

Dados		Simulação 01	Simulação 02	Simulação 03
Uso e Cobertura do Solo (%)	Floresta	98,5	31,8	31,8
	Pastagem	0,0	65,1	61,9
	Eucalipto	0,0	0,0	3,1
	Afloramento Rochoso	1,5	1,5	1,5
	Área Urbana	0,0	1,7	1,7
Balanço Hídrico	Precipitação (mm)	1604	1604	1604
	Evapotranspiração (mm)	1118	864	875
	Deflúvio (mm)	486	740	729
	ET/P (%)	69,7	53,9	54,6
	Q/P (%)	30,3	46,1	45,4

Os resultados dessas simulações servem de subsídio para o entendimento das alterações hidrológicas e erosivas ocorridas no MVRPS. Considerando que no período do café existem evidências que indicam que os rios drenavam sobre espessos pacotes sedimentares oriundos de uma transição climática do Pleistoceno para o Holoceno, o equilíbrio hidro-sedimentar identificado entre 8 Ka e 2 Ka (DIETRICH *et al.*, 1991; COELHO NETTO *et al.*, 1994; COELHO NETTO, 1999, vide Figura 23), provavelmente foi mantido pelo equilíbrio hidrológico proporcionado pela floresta Atlântica, que manteve elevados valores de evapotranspiração e reduzida proporção na relação Q/P. Isto significa que os rios deveriam apresentar um reduzido deflúvio, centrado principalmente no fluxo de base, uma vez que aproximadamente 70% da precipitação era evapotranspirada e a floresta nativa é um ambiente de infiltração.

Com a ampla e generalizada derrubada da floresta Atlântica para a implantação de plantios de café ocorreu uma significativa alteração hidrológica regional. Além das taxas de erosão das encostas dos plantios de café ( $3.737 \text{ m}^3/\text{Km}/\text{ano}$ ) terem sido superiores às registradas na transição do Pleistoceno-Holoceno ( $1.485 \text{ m}^3/\text{Km}/\text{ano}$ ), conforme indicado por Dantas e Coelho Netto (1995), a remoção da floresta ombrófila muito provavelmente acarretou uma redução acentuada da evapotranspiração regional. Esta alteração provavelmente resultou no aumento do deflúvio regional, seguindo um comportamento similar aos resultados de centenas de estudos compilados por Andreassian (2004) e Brown *et al.* (2005). Entretanto, este aumento do deflúvio pode não ter relação direta com uma elevação do NA e do aumento do fluxo de base dos canais, mas sim com o aumento do fluxo de chuva, pois as taxas de infiltração são menores em plantios de café quando comparadas com a floresta Atlântica. Segundo o conceito de estabilidade fluvial proposto por Lane (1957), um aumento do fluxo fluvial acarretaria a incisão vertical (degradação) dos canais, ao passo que o aumento da carga de sedimentos promoveria o assoreamento (agradiação). De alguma forma, o provável aumento do fluxo dos canais superou os efeitos decorrentes dos elevados aportes de sedimentos oriundos das encostas com plantios de café, que proporcionariam a incisão do leito dos canais sob antigos depósitos da transição Pleistoceno-Holoceno, conforme apresentado por Coelho Netto (1999). De fato, esta degradação foi amplamente identificada na bacia do rio Bananal, com a exposição de pacotes sedimentares com espessuras superiores a vinte metros (COELHO NETTO, 1999).

Com a decadência do ciclo cafeeiro e a substituição dos plantios de café por pastagem, provavelmente ocorreu mais uma vez a redução dos valores de evapotranspiração regional, proporcionando novo aumento do deflúvio dos canais, uma vez que as gramíneas possuem sistemas radiculares mais rasos e menores IAF que os plantios de café. Este novo aumento da relação Q/P está relacionada com o a continuidade do ciclo erosivo iniciado com os plantios de café como apontado por Coelho Netto (1999), com a formação de novas voçorocas ou reativação de outras que já se encontravam estabilizadas, associada à dinâmica hidro-erosiva das formigas saúva (DEUS, 1991).

Atualmente, a atual extensão dos plantios de eucalipto na bacia do rio Sesmaria representa pequenas alterações hidrológicas no deflúvio, uma vez que apenas 3% da área total da bacia foi convertida para este novo tipo de uso do solo. A modelagem indica que esta conversão resultou em alterações no balanço hídrico da ordem de 1%. Abdalad (2011) apontou que na sub-bacia do rio São João, onde ocorreu a maior conversão de pastagens para plantios de eucalipto, ocorre uma menor relação Q/P do que nas demais sub-bacias. Esta autora relaciona esta menor relação ao fato desta bacia apresentar proporcionalmente maiores coberturas de eucalipto e floresta ombrófila, que promovem a evapotranspiração e a redução do deflúvio.

Entretanto, como discutido no item anterior, embora o deflúvio possa ter apresentado pequenas variações, cabe destacar que os controles hidrológicos localmente nos plantios são completamente alterados na transição da cobertura de pastagem para os eucaliptos, predominando agora um ambiente de infiltração e que apresenta indicadores de reativação de processos erosivos por voçorocamento.

## **7 CONCLUSÕES**

---

Abaixo são enunciadas as conclusões do presente estudo:

- I) As ENPs demonstraram ser importantes fontes de sedimentos para os canais de drenagem, especialmente após a realização de reformas, quando grande quantidade de sedimentos é desagregado e mobilizado para as margens das estradas, causando o assoreamento dos canais. Parâmetros relacionados às ENPs (densidade, área ocupada, conectividade com a rede de drenagem, etc.) também estão relacionados com a dinâmica hidrossedimentar dos canais fluviais nos plantios de eucalipto;
- II) A sincronicidade da oscilação do NA nas cabeceiras de drenagem permite afirmar que o aquífero possui uma dinâmica regional na bacia do rio Sesmaria controlada por artesianismo através das fraturas;
- III) A ascensão do NA apresenta estreita relação com o acumulado de chuva de 120 dias e com precipitações semanais superiores a 100 mm, ao passo que a depleção do NA é promovida pelo fluxo de base dos principais rios da bacia;
- IV) A revisão de trabalhos anteriores sobre a oscilação da carga piezométrica aponta para uma relação positiva entre a velocidade da ascensão destes níveis com a densidade de fraturas das rochas;
- V) Existe um conjunto de indícios que a mudança de uso do solo de pastagens para plantios de eucalipto no MVRPS promove a ativação de erosões por água subterrânea (voçorocas) e que o desenvolvimento destas voçorocas está relacionado a processos diferentes nos fundos de vale (fluxo subterrâneo) e nas encostas (fluxos subsuperficiais);
- VI) A modelagem hidrológica histórica forneceu subsídios para o entendimento da dinâmica hidrológica frente às sucessivas alterações de uso e cobertura do solo

no MVRPS e o desmatamento generalizado da floresta Atlântica no século XVIII provavelmente acarretou na incisão/degradação dos canais fluviais pelo aumento do deflúvio dos canais de drenagem e ativação de voçorocas;

- VII) A substituição de pastagens pelo eucalipto apresenta impactos diferenciados de acordo com a escala espacial de análise: quando se analisa a bacia do rio Sesmaria como um todo esta mudança ocasionou pequenos impactos hidrológicos, uma vez que a cobertura de eucalipto é restrita a 3% da área total. À medida que a análise se faz em sub-bacias e cabeceiras de drenagem com maiores coberturas do solo pelos plantios de eucalipto observa-se um aumento da evapotranspiração e uma redução do deflúvio;

## **DESDOBRAMENTOS DA PESQUISA**

---

Abaixo são indicados alguns potenciais desdobramentos das pesquisas na bacia do rio Sesmaria relacionada com a implantação de plantios de eucalipto sobre antigas áreas de pastagem.

I) Continuidade dos monitoramentos de campo:

- Precipitação: monitoramento manual diário nas estações Sesmaria, São João, Feio, Formoso, Monte Alegre e Fazenda da Barra. As estações Caximonan II e Independência II possuem pluviômetros digitais com registro em intervalos de cinco minutos;
- Vazão nas cabeceiras de drenagem: monitoramento automático nas cabeceiras de drenagem com o uso de sensores automáticos de nível hidrostático com compensação atmosférica (Sitron LH480) associados a vertedores triangulares de 90° com medições em intervalos de cinco minutos;
- Vazão nos rios principais: monitoramento da cota linimétrica com duas leituras diárias (07:00 h e 17:00 h) feitas pelo leitor de campo nas seções de réguas instaladas nas quatro estações dos rios principais. Medidas diretas de vazão vêm sendo realizadas mensalmente em todas as estações com a utilização de micromolinete (Global Water – modelo FP201) em medições a vau. A relação cota-descarga de uma seção permite calcular a descarga que corresponde a uma dada altura de água, considerando-se a curva-chave uma função não linear unívoca entre nível e vazão;
- Carga de sedimentos transportados em suspensão (CSS): - nas cabeceiras de drenagem a CSS vem sendo quantificada através de coletas semanais de amostras de água de eflúvio dos vertedores, com posterior tratamento das amostras em laboratório por evaporação e pesagem;
- Oscilações do NA nas cabeceiras de drenagem: monitoramento manual realizado semanalmente em 11 poços distribuídos pelas quatro estações de cabeceiras de drenagem, além do monitoramento automático de dois destes poços por sensores de nível com compensação barométrica (HOBO U20). Em cada cabeceira de drenagem com plantio de eucalipto foi instalado um poço dentro da área de APP, enquanto os outros poços foram instalados no interior dos plantios a

aproximadamente 60 m de distância entre eles, visando monitorar assim a oscilação do NA nos fundos de vale e na baixa-média encosta;

- II) Nova etapa de expansão dos monitoramentos de campo por objetivo:
- **Compreender o papel do manejo florestal na infiltração, percolação e recarga da zona saturada em plantios com densidades (1.666 e 2.222 árvores/ha) e manejos pós-corte (reforma ou rebrota) diferenciados:**
    - Manutenção do monitoramento manual e automático de chuvas e da oscilação do NA para comparação do pré- com o pós-corte dos plantios de eucalipto;
    - Manutenção da mensuração automática da vazão nas cabeceiras de drenagem através de sensores de nível associados a vertedores;
    - Levantamento de parâmetros da vegetação (densidade, altura, área basal, IAF, biomassa, etc.);
    - Ampliação da rede de poços para diferentes vertentes das cabeceiras de drenagem monitoradas;
    - Implantação de monitoramento da percolação da água em diferentes profundidades e em diferentes posições na encosta com o uso de TDR para detecção da frente de molhamento e da transpiração da vegetação;
    - Instalação de rede de calhas coletoras de atravessamento e fluxo de tronco para avaliar a interceptação pelas copas;
  
  - **Quantificar o escoamento superficial e a erosão nas ENPs dos plantios de eucalipto e sua contribuição direta para a carga de sedimentos em suspensão nos canais fluviais durante os eventos de chuva:**
    - Manutenção do monitoramento automático de chuvas para caracterizar o volume, duração e intensidade dos eventos de chuva;
    - Caracterização das propriedades físicas do solo das ENPs (granulometria, densidade, porosidade, capacidade de infiltração, condutividade hidráulica, etc.);
    - Implementação de sistema de mensuração automático do volume de escoamento superficial e de coleta de amostras de CSS nas saídas d'água das ENPs dos plantios de eucalipto durante eventos de chuva;

- Monitoramento das intervenções nas ENPs, como atividades de conservação e reparo com a utilização de maquinário pesado (retroescavadeiras e Patrol);
- **Avaliar a influência dos plantios de eucalipto na quantidade (vazão) e qualidade (carga de sedimentos) dos principais rios da bacia hidrográfica do rio Sesmaria (rios Feio, Formoso, Sesmaria e São João):**
  - Manutenção do monitoramento manual e automático de chuvas e manual das cotas limimétricas;
  - Instalação de monitoramento automático da cota limimétrica visando avaliar as vazões durante os eventos de chuva e em pequenos intervalos de tempo;
  - Realização de campanhas de medição de vazão durante o período chuvoso com a utilização de ADCP para definição de curva-chave para momentos de elevada cota limimétrica;
  - Implantação de monitoramento da CSS com a utilização de amostradores US-DH-48 e amostradores automáticos para coleta durante eventos de chuva;
- **Monitorar a evolução das voçorocas em cabeceiras de drenagem com cobertura de gramíneas em áreas anexas aos plantios de eucalipto, definir e modelar a articulação da água subterrânea entre vales vizinhos e avaliar os diferentes processos de evolução destas feições erosivas nos fundos de vale e encostas laterais;**
  - Mensurações do contorno e profundidade das voçorocas através de topografia detalhada com uso de Estação Total e D-GPS;
  - Elaboração de um mapeamento topográfico na escala de 1:500 das cabeceiras de drenagem com presença das voçorocas, assim como das cabeceiras adjacentes com plantios de eucalipto com uso de Estação Total e D-GPS;
  - Ampliação da rede de poços e piezômetros nas cabeceiras de drenagem com eucalipto e nas com pastagem para estudo de redes de fluxo subterrâneo e voçorocamento;
  - Instalação de sistema de monitoramento com o uso de TDR de percolação vertical da água para detecção da frente de molhamento e recarga da zona saturada, assim como da percolação lateral para avaliar a importância dos fluxos

subsuperficiais rasos na base do sistema radicular de gramíneas para a evolução de voçorocas nas encostas;

- Modelagem da Rede de Fluxos Subterrâneos (FEFLOW 5.2) entre cabeceiras de drenagem adjacentes com calibração do modelo a partir de dados de campo e de amostras de solo (NA, condutividade hidráulica saturada e não saturada, propriedades físicas dos materiais, etc.);

## REFERÊNCIAS

---

ABDALAD, M.A. **Respostas hidrológicas ao plantio de eucalipto na bacia do rio Sesmaria, médio vale do rio Paraíba do Sul**. 2011. 99 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2011.

ABDALAD, M.A.; SATO, A.M.; COELHO NETTO, A.L. Resultante sócio-espacial da expansão do eucalipto no vale do rio Paraíba do Sul. In: **XXVII Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural da UFRJ**. UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2005, p. 177-178.

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2010. 2011. 120 p.

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (mata atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

ANDREASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, n. 1-2, p. 1-27, 2004.

ARMSON, K.A. **Forest Soils**: properties and processes. University of Toronto Press, Toronto. 1977. 390 p.

AVELAR, A.S.; COELHO NETTO, A.L. Fluxos d'água subsuperficiais associados à origem das formas côncavas do relevo. In: **1º COBRAE**, 1992b, p. 709-719.

AVELAR, A.S.; COELHO NETTO, A.L. Fraturas e desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio vale do rio Paraíba do Sul. **Rev. Bras. Geociências**, v. 22, n. 2, p. 222-227, 1992a.

BATES, C.G.; HENRY, A.J. Forest and stream-flow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado. **U.S. Weather Bureau Monthly Weather Review**, Supplement No. 30, 79 p., 1928.

BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, n. 1-4, p. 3-23, 1982.

BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P.; ARNAUD, M.; M'BOU, A.T.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOURDAN C. Changes with age in the spatial distribution of roots of *Eucalyptus* clone in Congo: impact on water and nutrient uptake. **Forest Ecology and Management**, v. 171, p. 43-57, 2002.

BRAGANÇA, M.A.; ZANUNCIO, J.; PIKANÇO, M.; LARANJEIRO, A.J. Effects of environmental heterogeneity on Lepidoptera and Hymenoptera populations in Eucalyptus plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 103, n. 2-3, p. 287-292, 1998.

BROWN, A.E.; ZHANG, L.; MCMAHON, T.A.; WESTERN, A.W.; VERTESSY, R.A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of Hydrology**, v. 310, n. 1-4, p. 28-61, 2005.

BULL, L.J.; KIRKBY, M.J. Gully processes and modelling. **Progress in Physical Geography**, v. 21, n. 3, p. 354-374, 1997.

CALIXTO, J.S.; RIBEIRO, E. M. Três olhares sobre o reflorestamento: a percepção de atores sociais sobre a monocultura de eucalipto no Alto Jequitinhonha, MG. **Organizações Rurais e Agroindustriais/Rural and Agro-Industrial Organizations**, v. 9, n. 1511-2016-131088, p. 437-450, 2007.

CÂMARA, C.D.; LIMA, W.P. Corte raso de uma plantação de Eucalyptus saligna de 50 anos: impactos sobre o balanço hídrico e a qualidade da água em uma microbacia experimental. **Scientia Forestalis**, v. 56, p. 41-58, 1999.

CAMBRA, M.F.E.S. **Extensão da rede de canais no médio vale do rio Paraíba do Sul: condicionantes morfológicos e lito-estruturais**. Monografia (Graduação), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

CAMBRA, M.F.E.S.; COELHO NETTO, A.L, Propriedades físicas do solo e densidade de raízes: variáveis-controle no processo de infiltração vertical do solo em áreas de pastagem, Bananal/SP. In: **Geosul**, CFH – Florianópolis 14., 1998.

CANADELL, J.; JACKSON, R.B.; EHLERINGER, J.B.; MOONEY, H.A.; SALA, O.E.; SCHULZE, E.D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. **Oecologia**, v. 108, p. 583-595, 1996.

CARLYLE-MOSES, D.E.; LAUREANO, J.F.; PRICE, A.G. Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. **Journal of Hydrology**, v. 297, n. 1-4, p. 124-135, 2004.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**. Editora Interciência, Rio de Janeiro. 2008.

CASTRO JÚNIOR, E. **O papel da fauna endopendônica na estruturação física do solo e seu significado para a hidrologia de superfície**. 1991. 150 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1991.

COELHO NETTO, A.L. Catastrophic landscape evolution in a humid region (SE Brazil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes. **Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria**, v. 3, n. 3, p. 21-48, 1999.

COELHO NETTO, A.L. Evolução de cabeceiras de drenagem no médio vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 4, p. 69-100, 2003.

COELHO NETTO, A.L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1994, p. 93-148.

COELHO NETTO, A.L. Overlandflow production in a tropical rainforest catchment: the role of litter cover. **Catena**, v. 14, n. 1-3, p. 213-231, 1987.

COELHO NETTO, A.L. **Surface hydrology and soil erosion in a tropical mountainous rainforest drainage basin, Rio de Janeiro**. 1985. 185 p. Phd thesis, Katholieke Univ. Leuven, Belgium. 1985.

COELHO NETTO, A.L.; FERNANDES, N.F.; DANTAS, M.E.; DIETRICH, W.E.; MONTGOMERY, D., DAVIS, J.C., PROCTOR, I., VOGGEL, J. e SOUTHON, J. 14C AMS evidences of two Holocene erosion-sedimentation cycles in SE Brasil: stratigraphy and stratigraphic inversions. In: **14th Intern. Sedimentary Congress**, IAS-Internat. Association of Sedimentologists, Recife, 1994, p. 28-30.

COELHO NETTO, A.L.; SANCHE, M. e PEIXOTO, M.N.O. Precipitação e interceptação florestal em ambiente tropical montanhoso, Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia**, v. 4, n. 2, p. 55-71, 1986.

CORNISH, P.M. The effects of roading, harvesting and forest regeneration on streamwater turbidity levels in a moist eucalypt forest. **Forest Ecology and Management**, v. 152, n. 1-3, p. 293-312, 2001.

CROCKFORD, R.H.; RICHARDSON, D.P.; SAGEMAN, R. Chemistry of rainfall, throughfall and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in south-eastern Australia: 3. Stemflow and total inputs. **Hydrological processes**, v. 10, n. 1, p. 25-42, 1996.

CROKE, J.; HAIRSINE, P.; FOGARTY, P. Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia. **Journal of Hydrology**, v. 216, n. 1-2, p. 56-77, 1999.

DANTAS, M.E. **Controles naturais e antropogênicos na sedimentação fluvial, especialmente não uniforme, na bacia do rio Bananal (SP/RJ): médio vale do rio Paraíba do Sul**. 1995. 142 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1995.

DANTAS, M.E.; COELHO NETTO, A.L. Resultantes geo-hidroecológicas do ciclo cafeeiro (1780-1880) no médio vale do rio Paraíba do Sul: uma análise quali-quantitativa. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 19, p. 61-78, 1996.

DEUS, E. **O papel da escavação das formigas do gênero Atta na hidrologia de encostas e áreas de pastagem – Bananal (SP)**. 1991. 135 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1991.

DIETRICH, W.E. & DUNNE, T. The channel head. **Channel network hydrology**, v. 799, p. 175-219, 1993.

DIETRICH, W.E., MONTGOMERY, D., COELHO NETTO, A.L., MOURA, J.R.S. Evidence for regional aggradation starting in the Early Holocene in southeastern Brazil and for degradation due to deforestation. **Am. Geoph. Union**, Fall Meet., San Francisco, USA/EOS, v. 70, n. 43, p. 1124, 1990.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L.B. **Water in environmental planning**. Macmillan, New York. 1978.

EIRADO SILVA, L.G.A. **A interação entre os eventos tectônicos e a evolução geomorfológica da serra da Bocaina, Sudeste do Brasil**. 2006. 273 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2006.

EL-LAKANY, M.H., MOHAMED, S.Y. Root characteristics of four tree species as affected by irrigation systems. **Alexandria Journal of Agricultural Research**, v. 38, n. 1, p. 183-210, 1993.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro. 1997. 212 p.

ENGEL, V.; JOBBÁGY, E.G.; STIEGLITZ, M.; WILLIAMS, M.; JACKSON, R.B. Hydrological consequences of Eucalyptus afforestation in the Argentine Pampas. **Water Resources Research**, v. 41, n. 10, 2005.

FABIÃO, A.; MARTINS, M.C.; CERVEIRA, C.; SANTOS, C.; LOUSÃ, M.; MADEIRA, M.; CORREIA, A. Influence of soil and organic residue management on biomass and biodiversity of understory vegetation in a Eucalyptus globulus Labill. plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 171, n. 1-2, p. 87-100, 2002.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2005**: Progress towards sustainable forest management. Rome. 2006. 350 p.

FAO. **Watershed management field manual**: road design and construction in sensitive watersheds. Rome. 1989. 196 p.

FERREIRA, D.C. **Avaliação da carga de sedimentos em suspensão em cabeceiras de drenagem com presença de plantios de eucalipto**: bacia do rio Sesmaria, médio vale do rio Paraíba do Sul. 2011. 44 p. Monografia (Graduação), Instituto de Biologia, Universidade Federal Fluminense. 2011.

FIBRIA. **Relatório de Sustentabilidade 2010**. São Paulo. 2011. 188 p.

FIRJAN. Silvicultura econômica no Estado do Rio de Janeiro. In: **Estudos de desenvolvimento para o Estado do Rio de Janeiro**, n. 5, 2009, 16 p..

FISRWG. **Stream corridor restoration**: principles, processes, and practices. National Technical Info Svc, 1998.

FONSECA, A.P. **Análise de mecanismos de escorregamento associados a voçorocamento em cabeceiras de drenagem na bacia do rio Bananal (SP/RJ)**. 2006. 348 p. Tese (Doutorado), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.

FONSECA, A.P.; COELHO NETTO, A.L.; LACERDA, W.A. Evolução de voçoroca e escorregamentos de terra em cabeceiras de drenagem na concavidade Três Barras, Bananal - SP: um estudo na interface geomorfológica-geotécnica. In: **SINAGEO - VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**. Goiânia, 2006.

FORD E.D.; DEANS J.D. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka spruce plantation. **Journal of Applied Ecology**, p. 905-917, 1978.

FREDRIKSEN, R.L. **Erosion and sedimentation following road construction and timber harvest on unstable soils in three small western Oregon watersheds**. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, US Department of Agriculture, 1970.

FREIRE ALLEMÃO, A.V. **Recarga e drenagem em solos florestados: o papel dos sistemas radiculares**. 1997. 136 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1997.

GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**, Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 1994, p. 149-209.

GUO, L. B.; SIMS, R. E. H. Eucalypt litter decomposition and nutrient release under a short rotation forest regime and effluent irrigation treatments in New Zealand: I. External effects. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, n. 10, p. 1381-1388, 2001a.

GUO, L. B.; SIMS, R. E. H. Eucalypt litter decomposition and nutrient release under a short rotation forest regime and effluent irrigation treatments in New Zealand: II. Internal effects. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, n. 7, p. 913-922, 2002.

GUO, L.B.; SIMS, R.E.H. Effects of light, temperature, water and meatworks effluent irrigation on eucalypt leaf litter decomposition under controlled environmental conditions. **Applied Soil Ecology**, v. 17, n. 3, p. 229-237, 2001b.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.D.C.; SILVA, L.D.; TROUW, R.A.J.; JANASI, V.D.A. A Província Mantiqueira. In: **O desvendar de um continente: a moderna geologia da América do Sul e o legado da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. Beca, São Paulo, 2004, p. 203-235.

HEILBRON, M; VALERIANO, C.M.; ALMEIDA, J.C.H.; TUPINAMBÁ, M. A megassinforma do rio Paraíba do Sul e sua implicação na compartimentação tectônica do setor central da Faixa Ribeira. In: **Atas do Simpósio de Geologia do Sudeste São Paulo**. SBG, São Paulo, 1991, p. 519-526.

HERWITZ, S.R. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation. **Earth surface processes and landforms**, v. 12, n. 4, p. 425-432, 1987.

HEWLETT, J.D. e NUTTER, W.D. Surface water, streamflow and the hydrograph. In: **An outline of forest hydrology**. University of Georgia Press, Athens, p. 87-105, 1969.

HEWLETT, J.D. **Principles of forest hydrology**. University of Georgia press, 1982.

HEWLETT, J.D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. **Forest Hydrology**, v. 1, p. 275-290, 1967.

HIBBERT, A.R. **Forest treatment effects on water yield**. Asheville: Coweeta Hydrologic Laboratory, Southeastern Forest Experiment Station, 1965.

HOLWERDA F, SCATENA FN, BRUIJNZEEL LA. Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: A comparison of sampling strategies. **Journal of Hydrology**, v. 327, n. 3-4, p. 592-602, 2006.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological society of America bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, p. 446-460, 1933.

HUBBARD, R.M.; STAPE, J.; RYAN, M.G.; ALMEIDA, A.C.; ROJAS, J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1714-1721, 2010.

JANSEN, R.C. **Distribuição dos sistemas radiculares em encostas florestadas e sua influência sobre a infiltração**. 2001. 118 p. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2001.

KEIM, R.F.; SKAUGSET, A.E.; WEILER, M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. **Journal of Hydrology**, v. 314, n. 1-4, p. 263-274, 2005.

KIMMINS J.P. Some statistical aspects of sampling throughfall precipitation in nutrient cycling studies in British Columbian coastal forests. **Ecology**, v. 54, n. 5, p. 1008-1019, 1973.

KIRKBY, M.J. **Process models and theoretical geomorphology**. Wiley & Sons, 1994.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; MOTA, A. **Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais**. 3a ed. UFSC/CTC/ENS/LabHidro, Florianópolis. 2011. 242 p.

KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; CORSEUIL, C.W. **Recursos hídricos e saneamento**. Organic Trading, Curitiba. 2008. 160 p.

KUCZERA, G. Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash-mixed species eucalypt forest. **Journal of Hydrology**, v. 94, n. 3-4, p. 215-236, 1987.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.P.; NZILA, J.D.; DELAPORTE, P. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo: 1. Chemical composition of rainfall, throughfall and stemflow solutions. **Forest ecology and management**, v. 176, n. 1-3, p. 105-119, 2003.

LANE, P.N.; MACKAY, S.M. Streamflow response of mixed-species eucalypt forests to patch cutting and thinning treatments. **Forest Ecology and Management**, v. 143, n. 1-3, p. 131-142, 2001.

LANE, P.N.; MORRIS, J.; NINGNAN, Z.; GUANGYI, Z.; GUOYI, Z.; DAPING, X. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, n. 3-4, p. 253-267, 2004.

LANE, P.N.; MORRIS, J.; NINGNAN, Z.; GUANGYI, Z.; GUOYI, Z.; DAPING, X. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, n. 3-4, p. 253-267, 2004.

LANE, P.N.; SHERIDAN, G.J. Impact of an unsealed forest road stream crossing: water quality and sediment sources. **Hydrological processes**, v. 16, n. 13, p. 2599-2612, 2002.

LANGFORD, K. J. Change in yield of water following a bushfire in a forest of Eucalyptus regnans. **Journal of Hydrology**, v. 29, n. 1-2, p. 87-114, 1976.

LAWRENCE, G.B.; FERNANDEZ, I.J. A reassessment of areal variability of throughfall deposition measurements. **Ecological Applications**, v. 3, n. 3, p. 473-480, 1993.

LE MAITRE, D.C.; SCOTT, D.F.; COLVIN, C. Review of information on interactions between vegetation and groundwater. **Water SA**, v 25, n. 2, p. 137-152, 1999.

LEAL, P.J.V. **Crescimento de redes de canais e pirataria de água subterrânea em vales de cabeceiras de drenagem: modelagem numérica tridimensional**. 2009. 214 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009.

LEITE, A.F. **Variações hidrogeoquímicas nos compartimentos montanhoso e colinoso da bacia do rio Bananal (SP): subsídios à compreensão dos processos de intemperismo**. 2006. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.

LIKENS, G.E. Experimental approach for the study of ecosystems. **Journal of Ecology**, 1985.

LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2ª ed. EDUSP, São Paulo. 1996. 301p.

LIMA, W.P. Overland flow and soil and nutrient losses from Eucalyptus plantations. **IPEF International**, v. 1, p. 35-44, 1990.

LIMA, W.P.; JARVIS, P.; RHIZOPOULOU, S. Stomatal responses of Eucalyptus species to elevated CO<sub>2</sub> concentration and drought stress. **Scientia Agricola**, v. 60, p. 231-238, 2003.

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. **As florestas plantadas e a água**: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. Rima, São Carlos. 2006. 226 p.

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B.; LIBARDI, P.L.; SOUZA FILHO, A.P. Comparative evapotranspiration of Eucalyptus, Pine and natural "Cerrado" vegetation measure by the soil water balance method. **IPEF International**, v. 1, p. 5-11, 1990.

LOESCHER, H.W.; POWERS, J.S.; OBERBAUER, S.F. Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, n. 3, p. 397-407, 2002.

LOUZADA, J.N.C.; SCHOEREDER, J.H.; MARCO JÚNIOR, P. Litter decomposition in semideciduous forest and Eucalyptus spp. crop in Brazil: a comparison. **Forest ecology and Management**, v. 94, n. 1-3, p. 31-36, 1997.

MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. A planificação da rede rodoviária em reflorestamentos. **Simpósio Sobre Exploração, transporte, Ergonomia e Segurança em Reflorestamentos**, p. 01-13, 1987.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. In: **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**, v. 2, 2000, p. 13-33.

MARSHALL, J.K.; MORGAN, A.L.; AKILAN, K.; FARRELL, R.C.; BELL, D.T. Water uptake by two river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) clones in a discharge site plantation in the Western Australian wheatbelt. **Journal of Hydrology**, v. 200, n. 1-4, p. 136-148, 1997.

MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; RUIZ-SINOGA, J. D. Seasonal changes in the hydrological and erosional response of a hillslope under dry-Mediterranean climatic conditions (Montes de Málaga, South of Spain). **Geomorphology**, v. 88, n. 1-2, p. 69-83, 2007.

MEIRELLES, M. L.; FRANCO, A.C.; FARIAS, S.E.M.; BRACHO, R. Evapotranspiration and plant-atmospheric coupling in a *Brachiaria brizantha* pasture in the Brazilian savannah region. **Grass and Forage Science**, v. 66, n. 2, p. 206-213, 2011.

MELOS, A.R.; SATO, A.M.; COELHO NETTO, A.L. Produção, estoque e retenção hídrica da serrapilheira em encosta sob plantio de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* no médio vale do rio Paraíba do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, UFRJ, v. 33, p. 66-73, 2010.

MIELKE, M.S.; OLIVA, M.A.; BARROS, N.F.; PENCHEL, R.M.; MARTINEZ, C.A.; ALMEIDA, A.C. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. **Trees**, v. 13, p. 152-160, 1999.

MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; WALLING, D.E. REICHERT, J.M. Changing sediment yield as an indicator of improved soil management practices in southern Brazil. **Catena**, v. 79, n. 3, p. 228-236, 2009.

MIRANDA, J.C. **Intercepção das chuvas pela vegetação florestal e serrapilheira nas encostas do Maciço da Tijuca: Parque Nacional da Tijuca, RJ**. 1992. 100 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1992.

MONTEZUMA, R.C. **Produção e reabilitação funcional do piso florestal em clareira de deslizamento – Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro**. 2005. 294 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.

MORTIMER, L.; AYDIN, A.; SIMMONS, C.T.; LOVE, A.J. Is in situ stress important to groundwater flow in shallow fractured rock aquifers?. **Journal of Hydrology**, v. 399, n. 3-4, p. 185-200, 2011.

MULATO, T.A.; LEAL, P.J.V.; AVELAR, A.S.; COELHO NETTO, A.L. Parâmetros de Solos Voltados para Modelagem de Fluxos Subterrâneos Relacionados aos Processos de Voçorocamento: Bacia do Rio Bananal, SP/RJ. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Viçosa - MG, 2009.

MUSGRAVE, G.W. The quantitative evaluation of factors in water erosion: a first approximation. **Journal of soil and water conservation**, v. 2, p. 133-138, 1947.

NEGREIROS, A.B. **Variabilidade do atravessamento de chuvas em ambiente de floresta clímax e suas relações com a estrutura da vegetação: o caso da mata do Pai Ricardo – Floresta da Tijuca – RJ**. 2004. Monografia (Graduação), Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004.

NERI, A.V.; CAMPOS, E.P.; DUARTE, T.G.; MEIRA NETO, J.A.A. Regeneração de espécies nativas lenhosas sob plantio de Eucalyptus em área de Cerrado na Floresta Nacional de Paraopeba, MG, Brasil. **Acta botanica brasílica**, v. 19, p. 369-376, 2005.

O'GRADY A.P.; WORLEDGE D.; BATTAGLIA M. Temporal and spatial changes in fine root distributions in a young Eucalyptus globulus stand in southern Tasmania. **Forest Ecology and Management**, v. 214, n. 1-3, p. 373-383, 2005.

OLIVEIRA, R.R. e COELHO NETTO, A.L. Captura de nutrientes atmosféricos pela vegetação na Ilha Grande, RJ. **Pesquisa Botânica**, v. 51, p. 31-49, 2001.

PELLENS, R., GARAY, I. Edaphic macroarthropod communities in fast-growing plantations of Eucalyptus grandis Hill ex Maid (Myrtaceae) and Acacia mangium Wild (Leguminosae) in Brazil. **European Journal of Soil Biology**, v. 35, n. 2, p. 77-89, 1999.

PEREIRA, A.R.; CAMARGO, M.B.P.; VILLA NOVA, N.A. Coffee crop coefficient for precision irrigation based on leaf area index. **Bragantia**, v. 70, p. 946-951, 2011.

POORE, M.E.D., FRIES C. **The ecological effects of Eucalyptus**. FAO, Rome, 1985.

RAAT K.J; DRAAIJERS, G.P.J.; SCHAAP, M.G.; TIETEMA, A.; VERSTRATEN, J.M. Spatial variability of throughfall water and chemistry and forest floor water content in a Douglas fir forest stand. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, n. 3, p. 363-374, 2002.

RAM, J.; GARG, V.K.; TOKY, O.P.; MINHAS, P.S.; TOMAR, O.S.; DAGAR, J.C.. KAMRA, S.K. Biodrainage potential of Eucalyptus tereticornis for reclamation of

shallow water table areas in north-west India. **Agroforestry systems**, v. 69, p. 147-165, 2007.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F. & EICHHORN, S.E. **Biologia vegetal**. 6ª ed., Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 2006.

REZENDE, M.L.; VALE, A.B.; REIS, M.G.F.; SILVA, A.F. & NEVES, J.C.L. Regeneração natural de espécies florestais nativas em sub-bosque de *Eucalyptus grandis* e em mata secundária no Município de Viçosa, Zona da Mata, MG, Brasil. In: **Anais do I Simpósio Sul-Americano e II Simpósio Nacional de Recuperação de Áreas Degradadas**, Foz do Iguaçu, p. 409-418, 1994.

RIBEIRO, C.; MADEIRA, M. & ARAÚJO, M.C. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes. **Forest Ecology and Management**, v. 171, n. 1-2, p. 31-41, 2002.

ROBERTS, S., VERTESSY, R., GRAYSON, R. Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. **Forest Ecology and Management**, v. 143, n. 1-3, p. 153-161, 2001.

ROCHA LEÃO, O.M. **Evolução regressiva da rede de canais por fluxos de água subterrânea em cabeceiras de drenagem: bases geo-hidroecológicas para a recuperação de áreas degradadas com controle de erosão**. 2005. 247 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.

SANTOS, I.D.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.V.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria aplicada**. Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, Curitiba. 2001.

SATO, A.M. **Respostas geo-hidroecológicas à substituição de pastagens por plantações de eucalipto no médio vale do rio Paraíba do Sul: a interface biota-solo-água**. 2008. 160 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.

SATO, A.M., AVELAR, A.S., COELHO NETTO, A.L. Spatial variability and temporal stability of throughfall in a eucalyptus plantation in the hilly lowlands of southeastern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 12, p. 1910-1923, 2011.

SATO, A.M.; VIANNA, L.G.G., ALMEIDA, R.C.G., AVELAR, A.S. e COELHO NETTO, A.L. Changing landscape mosaic of the mid-Paraíba do Sul river valley: geo-hydroecological responses to *Eucalyptus* growth. In: **25 Years of Landscape Ecology: Scientific Principles in Practice**, Wageningen, Netherlands. p. 526, 2007.

SCARANO, F.R.; RIOS, R.I.; ESTEVES, F.A. Tree species richness, diversity and flooding regime: case studies of recuperation after anthropic impact in Brazilian flood-

prone forests. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**, v. 24, p. 223-235, 1998.

SCHAAP, M.G.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN, J.M. Forest floor water content dynamics in a Douglas fir stand. **Journal of Hydrology**, v. 201, n. 1-4, p. 367-383, 1997.

SCHIMEL, D.S.; BRASWELL, B.H.; PARTON, W.J. Equilibration of the terrestrial water, nitrogen, and carbon cycles. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 94, n. 16, p. 8280-8283, 1997.

SCOTT, D.F.; LESCH, W. Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa. **Journal of Hydrology**, v. 199, n. 3-4, p. 360-377, 1997.

SHACHNOVICH, Y.; BERLINER, P.R.; BAR, P. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone. **Journal of Hydrology**, v. 349, n. 1-2, p. 168-177, 2008.

SHARDA, V.N.; SAMRAJ, P.; SAMRA, J.S.; LAKSHMANAN, V. Hydrological behaviour of first generation coppiced bluegum plantations in the Nilgiri sub-watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 211, n. 1-4, p. 50-60, 1998.

SHIKLOMANOV, I.A. **World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st century**. IHP, Unesco, 1998. 32 p.

SIKKA, A.K., SAMRA, J.S., SHARDA, V.N., SAMRAJ, P., LAKSHMANAN, V. Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiris watersheds of South India. **Journal of Hydrology**, v. 270, n. 1-2, p. 12-26, 2003.

SILVA E.V., GONÇALVES L.M., COELHO S.R.F., MOREIRA R.M., MELLO S.L.M., BOUILLET J.P., JOURDAN C., LACLAU J.P. Dynamics of fine root distribution after establishment of monospecific and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. **Plant and soil**, v. 325, p. 305-318, 2009.

SILVEIRA, C.S. **Infiltração e transporte de solutos na zona não saturada de um solo florestal – Parque Nacional da Tijuca, RJ**. 2004. 217 p. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004

SILVEIRA, C.S.; BARBOSA, M.C.; COELHO NETTO, A.L. A tracer experiment as an alternative methodology to understand infiltration pathway in a tropical rainforest soil. **Solos e Rochas**, v.28, n. 3, p. 261-270, 2005.

SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 253, n. 1-4, p. 130-147, 2001.

- STAELENS, J., SCHRIJVER, A.D.; VERHEYEN, K.; VERHOEST, N.E.C. Spatial variability and temporal stability of throughfall deposition under beech (*Fagus sylvatica* L.) in relationship to canopy structure. **Environmental Pollution**, v. 142, n. 2, p. 254-263, 2006.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest ecology and management**, v. 193, n. 1-2, p. 17-31, 2004.
- STRAHLER, A.N. Dynamic basis of geomorphology. **Geological society of america bulletin**, v. 63, n. 9, p. 923-938, 1952.
- TÓTH, J. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 2, p. 164-176, 1970.
- TÓTH, J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. **Journal of geophysical research**, v. 68, n. 16, p. 4795-4812, 1963.
- TÓTH, J. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. **Hydrogeology journal**, v. 7, p. 1-14, 1999.
- TSUKAMOTO, Y.; MINEMATSU, H. Hydrogeomorphological characteristics of a zero-order basin. **IAHS- publication**, n.165, p.61-70, 1987.
- TUCCI, C.E.M., BERTONI, J.C. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª ed. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre. 2000. 943 p.
- VALENTE, F.; DAVID, J.S.; GASH, J.H.C. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. **Journal of Hydrology**, v. 190, n. 1-2, p. 141-162, 1997.
- VALERIANO, C. M.; HEILBRON, M. C. P. L. A zona de transtensão de Volta Redonda e sua implicação na compartimentação tectônica da porção central da Faixa Ribeira. In: **Simpósio de Geologia do Sudeste**, Rio de Janeiro, 1993.
- VALLEJO, L.R. **A influência do "litter" na distribuição das águas pluviais**. 1982. 123 p. Tese (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1982.
- VALLEJO, L.R.; VALLEJO, M. S. Aspectos da dinâmica hidrológica em áreas florestadas e suas relações com os processos erosivos - primeiros resultados. In: **IV Simpósio do Quaternário no Brasil**, 1981, Rio de Janeiro. Atas do IV Simpósio do Quaternário no Brasil. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1981. v. 1. p. 365-380.
- VERSFELD, D.B. Overland flow on small plots at the Jonkershoek Forestry Research Station. **South African Forestry Journal**, v. 119, n. 1, p. 35-40, 1981.

VERTESSY, R.A.; WATSON, F.G.; SHARON, K.O. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. **Forest Ecology and Management**, v. 143, n. 1-3, p. 13-26, 2001.

VIANNA, L.G.G.; SATO, A.M.; FERNANDES, M.C.; COELHO NETTO, A.L. Fronteira de expansão dos plantios de eucalipto no geocossistema do médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). In: **Anais I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico**, Taubaté, Brasil, IPABHi, p. 367-369, 2007.

WATSON, F.; VERTESSY, R.; MCMAHON, T.; RHODES, B.; WATSON, I. Improved methods to assess water yield changes from paired-catchment studies: application to the Maroondah catchments. **Forest Ecology and Management**, v. 143, n. 1-3, p. 189-204, 2001.

WEST, P.W. **Growing plantation forests**. Springer, Heidelberg. 2006. 304 p.

WHELAN MJ, SANGER LJ, BAKER M, ANDERSON JM. Spatial patterns of throughfall and mineral ion deposition in a lowland Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 20, p. 3493-3501, 1998.

ZHANG, L.; DAWES, W.R.; WALKER, G.R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water resources research**, v. 37, n. 3, p. 701-708, 2001.

ZHANG, L.; WALKER, G.R.; DAWES, W. **Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance**. 1999.

ZHOU, G.Y.; MORRIS, J.D.; YAN, J.H.; YU, Z.Y.; Peng, S.L. Hydrological impacts of reafforestation with eucalypts and indigenous species: a case study in southern China. **Forest Ecology and Management**, v. 167, n. 1-3, p. 209-222, 2002.

ZIMMERMANN, A.; WILCKE, W.; ELSENBEER, H. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. **Journal of Hydrology**, v. 343, n. 1-2, p. 80-96, 2007.

ZOHAR, Y.; SCHILLER, G. Growth and water use by selected seed sources of Eucalyptus under high water table and saline conditions. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 69, n. 3, p. 265-277, 1998.