



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - UFRJ**

**HUGO ALVES SOARES LOUREIRO**

**DIAGNÓSTICO DE EROSÃO POR VOÇOROCAS: Experimentos com  
Geotecnologias e Solos na Bacia do Alto Rio Pirai – Rio Claro-RJ**

**RIO DE JANEIRO**

**Julho de 2019**

**Hugo Alves Soares Loureiro**

**DIAGNÓSTICO DE EROÇÃO POR VOÇOROCAS: Experimentos com  
Geotecnologias e Solos na Bacia do Alto Rio Pirai – Rio Claro-RJ.**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (Planejamento e Gestão Ambiental), Instituto de Geociências, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Professor Dr. Antonio José Teixeira Guerra  
Coorientador: Pesquisador Dr. Aluísio Granato de Andrade

**Rio de Janeiro  
Julho de 2019**

## CIP - Catalogação na Publicação

L892d Loureiro, Hugo Alves Soares  
DIAGNÓSTICO DE EROÇÃO POR VOÇOROCAS: Experimentos  
com Geotecnologias e Solos na Bacia do Alto Rio  
Piraí - Rio Claro-RJ / Hugo Alves Soares Loureiro. --  
Rio de Janeiro, 2019.  
224 f.

Orientador: Antonio José Teixeira Guerra.  
Coorientador: Aluísio Granato de Andrade.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de  
Pós-Graduação em Geografia, 2019.

1. Erosão. 2. Geotecnologias. 3. Laser Scanner  
Terrestre. 4. Rio Piraí. I. Guerra, Antonio José  
Teixeira, orient. II. Andrade, Aluísio Granato de,  
coorient. III. Título.

Hugo Alves Soares Loureiro

DIAGNÓSTICO DE EROÇÃO POR VOÇOROCAS: Experimentos com  
Geotecnologias e Solos na Bacia do Alto Rio Piraí – Rio Claro-RJ

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (Planejamento e Gestão Ambiental), Instituto de Geociências, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências.

Aprovada em 09/07/2019

---

Antonio José Teixeira Guerra, Ph.D. (Orientador – Dep. de Geografia – IGEO/UFRJ)

---

Alúcio Granato de Andrade, D.Sc. (Coorientador – EMBRAPA SOLOS)

---

Antônio Soares da Silva, D.Sc. (Dep. de Geografia – UERJ)

---

Francisco Jácome Gurgel Júnior, D.Sc. (UniFOA – Volta Redonda)

---

José Fernando Rodrigues Bezerra, D.Sc. (Dep. de Geografia – UEMA)

---

Manoel do Couto Fernandes, D.Sc. (Dep. de Geografia – IGEO/UFRJ)

Dedico a todos que amo. Primeiro, às duas mulheres mais importantes ao meu lado, minha mãe e minha namorada. À minha Vó, Wandilza, *in memoriam*. À minha família (tia, pai e esposa, irmão, avó, primos-irmãos). Aos grandes Amigos do peito, desde a infância, desde a adolescência e desde a Universidade. Que viram de alguma forma, vitórias e tropeços, desse caminho tortuoso, ajudando a torná-lo mais alegre.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e todas as forças, energias ou entidades divinas e/ou santas, do Bem, que me permitiram chegar ao fechamento deste ciclo, com muito aprendizado.

À minha mãe, Regina Célia Alves Soares Loureiro, conhecida por aqui como Regininha, que saiu aposentada antes de eu finalizar a tese, quem diria. Que sempre investiu no meu futuro, com muito amor e empenho. Quem muito me ajudou, de diversas maneiras, às vezes em tarefas distantes de sua realidade de lapiseiras e canetas, durante o período extensivamente prorrogado de escrita da tese, me poupando tempo precioso e sempre por perto, torcendo pelo sucesso dessa caminhada, com muito orgulho e amor.

À minha namorada, Talita Shewry. Minha companheira, minha amiga, minha incentivadora constante, minha futura esposa. Tenho certeza absoluta que se não fosse você, eu não teria chegado até aqui. Seu apoio foi e é fundamental para mim. Sempre ponderando minhas ideias confusas e aflitas sobre os rumos da vida. Sempre me mostrando com didática inigualável e de jeito único os lados bons e ruins das situações. Que muito me ajudou, com comidas, com as referências bibliográficas na hora do aperto final, com incontáveis agradados e mimos, com muita compreensão acadêmica, pois está no mesmo barco dos doutorandos. Ainda que eu consiga fazê-la perder a paciência com minha indisciplina com prazos. Meu aconchego, meu escape nas horas mais necessárias. Sobretudo, muito carinho e amor.

À minha sogra, Bel, com seu jeito doce, sua tranquilidade, seu carinho, seu apoio e sua ajuda com um muito prático e carinhoso sustento alimentar por tanto tempo neste doutorado, para me poupar tempo de eu ir pra cozinha, para me dedicar à tese.

Ao meu orientador, Antonio José Teixeira Guerra, pela amizade criada no convívio de quase 12 anos de LAGESOLOS, pela paciência constantemente renovada, sobretudo, pela confiança de sempre. Obrigado por tantas oportunidades, aprendizados, histórias a contar. Seguiremos daqui a novos projetos e novos aniversários, inclusive partilhando novas chances de vida, nos dias 27 de abril e 15 de junho, guardadas as proporções, certamente.

Ao meu coorientador, Aluísio Granato de Andrade, que desde o primeiro momento abraçou “minha causa”, na parceria com a EMBRAPA para concessão de bolsa de doutorado, que foi parceiro nos momentos reunidos, que rumou à caça de voçorocas, solidariamente, por Angra dos Reis, Paraty e Rio Claro (RJ). Obrigado pela atenção especial de todos os nossos encontros. Fica o desejo para que tornemos a trabalhar juntos de alguma maneira.

A CAPES e à EMBRAPA, pela concessão da bolsa de doutorado por 48 meses.

Ao professor Manoel do Couto Fernandes, Coordenador do PPGG (UFRJ), e membro da banca avaliadora. Sempre solícito com seu jeito amigo de ser, sempre disposto a ajudar e resolver situações diversas. Muito obrigado por várias conversas aleatórias, por seu humor e

companheirismo, pela oferta e empréstimo do *Laser Scanner*, que possibilitou novos horizontes e resultados a esta tese. Sem dúvida daremos continuidade a estes bons momentos.

Ao Professor Ricardo César (Geografia – UFRJ), que sempre carismático dividiu suas experiências e dicas em vários momentos pelos corredores e em seu laboratório, onde realizamos um ensaio experimental com minhocas *Eisenia andrei*, a ser publicado.

À minha grande amiga, Tainá Laeta, sempre em conversas cheias de gargalhada, muitas conversas sérias, muita política analisada e compartilhada, sobretudo, pelas ajudas importantíssimas com bases cartográficas e ajuda indo a campo para utilizarmos o *Laser Scanner* na voçoroca.

Ao Kairo (GeoCart) pela ajuda fundamental no manuseio e realização do escaneamento da voçoroca. Ao Fernando (GeoCart) pelas dicas com o *software Cyclone*.

Aos amigos de LAGESOLOS, os que permanecem e os que rumaram a outros destinos, que participaram diretamente desta tese, em trabalhos de campo e análises de laboratório ou auxílios em gabinete, em especial aos três primeiros, com participações fundamentais nesta pesquisa: Domynique Santos, “minha gerente” e Diego Janoti, “nosso serviços gerais”, sem esses dois, não tinha análise de solo por aqui, a liderança dela e a força braçal dele; Fabrizio Garritano, pela parceria desde orientar sua monografia até escrevermos trabalhos e o uso do Drone/VANT na área de estudo; Hugo Pepe, meu xará, “meu sucessor”, que ajudou bastante com as análises também; Yolanda Molinaro; Gabriel Finotti; Rafael Carvalho; Leonardo Pereira, Armando Frota; Luana Rangel; Aline Muniz; à Carmen, pelas confraternizações, quitutes e lembrancinhas; à Maju, é claro! Afinal, seu 1º campo na vida foi comigo; Prof. Raphael David; Professoras Rosângela Garrido M. Botelho e Cristine Cardoso e todos mais que estão na minha memória e no meu percurso.

Ao Senhor Márcio (do Pesque e Pague – Rio Claro/RJ), *in memorium*, proprietário das terras da voçoroca A, que permitiu que estudássemos ali, sempre solícito, atencioso e de bom papo, autorizou a reinstalação do pluviógrafo em frente à sua casa, auxiliando com ferramentas e todo apoio possível.

À dona Helena, então proprietária da Pousada Recanto de Lídice (até final de 2017), com seu apoio logístico de hospedagem. Ao seu filho, Lindolpho, Eng. Florestal do ITPA, que apresentou as voçorocas B e C, contribuindo com muitas informações pertinentes.

Ao professor Antonio Soares da Silva (Geografia – UERJ) pelo apoio, confiança e incentivo de sempre. Aliás, põe incentivo nisso, muito obrigado mesmo!

Ao Prof. Mike Fullen, da Universidade de Wolverhampton (Inglaterra), por sua atenção e humor característico, sempre uma visita marcante ao Brasil.

Aos professores André Avelar (Geografia – UFRJ), sempre atencioso; e Helena Polivanov (Geologia – UFRJ), por participarem da banca de qualificação oral.

Ao técnico Roberto (do LAGESED) pelo empréstimo do funil, para agilizar análises de granulometria.

À minha *Vó*, Wandilza Alves Soares, *in memoriam* (1923-2011), com toda a saudade e alegria de ter disfrutado ao máximo os incontáveis momentos juntos, de muito amor mútuo.

Ao meu pai, Alexandre Masson Ferreira Loureiro, pelo amor, amizade e cuidado; meu irmão Matheus Borges Masson, meu xodó, com sua confiança e tanto amor mútuo; minha vovó Lourdes e seu jeito conquistador e animado, cheia de vitalidade e graça; à Luciene Branco, por tantos papos maneiros e muito, muito carinho. A vocês meu obrigado por compartilharem tantos momentos ao longo desses anos de tantas ausências minhas para estar aqui completando este ciclo. Vocês fazem parte disso, sem dúvidas.

Aos muitos funcionários da casa. Ao pessoal da Biblioteca do PPGG, pelo apoio logístico estratégico da hora do almoço e amizade: Kátia, Valéria, Leidiane, Mariana, Levi, Grazi e Alexandre. Ao Bruno, da Secretaria do PPGG; à Carla, sua antecessora, por serem sempre extremamente eficientes, solícitos, atenciosos, profissionais de altíssimo nível; aos amigos do Transporte do IGEO: Eduardo “Botafoguense”, Vanderlei, Edinaldo, Sidnei, pelos não tantos trabalhos de campo, mas pelo apoio de sempre, fundamentais. Ao Senhor Wagner, do Patrimônio; ao Setor Financeiro; ao Luiz Cláudio Negreiros, do CCMN; à Cristina, do IGEO, sempre prestativa. Ao Seu Nelson e ao Thiago, do financeiro das Pós-graduações do IGEO, por toda a simpatia, boa conversa e ótimo trabalho.

Aos meus grandes amigos-irmãos do coração, Danilo Oliveira e Amanda Rodrigues, simplesmente por tudo, broncas, incentivos, (in)compreensão da minha ausência frequente. Só vocês mesmos para me aturar! Amo vocês. Sempre juntos.

A todos mais que eu possa não ter lembrado neste último momento de correria, que certamente tenham contribuído de alguma forma, sem dúvida tiveram sua importância.

“Faça o seu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!”.

Mário Sérgio Cortella

## RESUMO

LOUREIRO, Hugo Alves Soares. Diagnóstico de erosão por voçorocas: experimentos com geotecnologias e solos na bacia do Alto rio Pirai – Rio Claro-RJ. Tese de Doutorado. PPGG/UFRJ, Rio de Janeiro, 2019. 251p.

A presente tese pesquisa a erosão dos solos por ação da água sobre as encostas, especificamente sua feição erosiva mais destacada nas paisagens, as voçorocas. Com a finalidade de constituir um diagnóstico dos processos erosivos e servir de referência para gestores e tomadores de decisão em geral, que visem compreender e atuar no controle da erosão, experimentos com geotecnologias e ensaios de laboratório com amostras de solos foram conduzidos, visando à caracterização e análise do processo de degradação nas áreas estudadas. O intuito principal é: mostrar que tipos de ferramentas estão disponíveis; como podem ser acessadas e trabalhadas, considerando os recursos financeiros, de pessoal e especialização disponíveis; e os objetivos do monitoramento. Foram utilizadas: ortofotomosaico do IBGE, com fotos aéreas tomadas em 2006; séries temporais de imagens de satélite de alta resolução espacial do *software Google Earth Pro* (entre 2001 e 2017); imagens aéreas obtidas com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Com o ortomosaico e as imagens do *Google Earth Pro* foram mapeadas 25 voçorocas na bacia hidrográfica do Alto rio Pirai, antes e depois dos trabalhos de campo com checagem. A outra geotecnologia utilizada foi a varredura a laser terrestre, com o chamado Laser Scanner Terrestre (LST). Sua aquisição de dados possibilitou análises quantitativas da voçoroca A. Além das medidas das diferentes seções da feição, a nuvem de pontos possibilitou a modelagem 3D e cálculo da estimativa de volume, registrando 20,34 m<sup>3</sup> de solo erodido, correspondendo a 32,34 toneladas de solo que saíram da voçoroca, numa área de 0,22 ha. Extrapolando os valores e considerando 17 anos de atividade, seria uma taxa de erosão de 8,65 t·ha<sup>-1</sup>·ano. As análises de erodibilidade dos solos indicam predomínio de solos com texturas médias, com teores de silte inferiores a 300 g/kg combinados a teores de argila maiores que 50 g/kg. Assim, estes solos não seriam tão propensos à erosão, não fossem, porém, os baixos valores de porosidade, matéria orgânica do solo e a alta compactação. Entre as duas voçorocas estudadas, chamadas de A e B, os resultados das análises de solo apontam maior suscetibilidade erosiva para a área de estudo A em relação à área B. Esta hipótese é reforçada pela análise qualitativa de alguns produtos de geotecnologias. Outro resultado importante foi verificado na comparação entre o mapeamento com bases cartográficas vetoriais oficiais do IBGE e a extração de delimitação de bacias de imagens SRTM. Houve diferença significativa em termos de mapeamento geomorfológico, que devem ser objeto de estudo de trabalhos futuros. O LST gerou os melhores resultados em termos quantitativos enquanto VANT e *Google Earth Pro* os melhores qualitativos. Conclui-se que os métodos são complementares e devem compor diagnósticos, sempre que possível. Por fim, são feitas sugestões para continuidade de pesquisas futuras a partir das questões levantadas.

**Palavras-chave:** Erosão; Geotecnologias; *Laser Scanner* Terrestre; rio Pirai.

## ABSTRACT

LOUREIRO, Hugo Alves Soares. Diagnóstico de erosão por voçorocas: experimentos com geotecnologias e solos na bacia do Alto rio Pirai – Rio Claro-RJ. Tese de Doutorado. PPGG/UFRJ, Rio de Janeiro, 2019. 251p.

This thesis researches about hillslope soil erosion by water, especially the highlighted erosion feature in the landscapes, gullies. Aiming at producing erosion assessment and serving as a reference to decision makers in general, who wish to comprehend and act on erosion control, experiments were carried out with geotechnologies and soil samples laboratory analysis, to characterize and to interpret degrading processes on different study site. The main objective is: to show what types of techniques are available; how they can be accessed and worked, considering financial and specialized staff levels required; including the objectives of monitoring. There were used: orthophotomosaic from IBGE, with aerial photos taken in 2006; temporal series of high resolution satellite images from Google Earth Pro software (between 2001 and 2017); aerial photographs obtained by Unmanned Aerial Vehicle (UAV). With orthophotomosaic and Google Earth Pro images 25 gullies were mapped in Alto Pirai river basin, before and after checking fieldtrips. Other geotechnology used was the laser scan, with Terrestrial Laser Scanner (TLS). Its acquisition made possible some quantitative analysis from Gully A. In addition to measurements of some gully's sections, a point cloud generate some 3D modelling that estimates volume of the gully, registering 20.34 m<sup>3</sup> of eroded soil, corresponding to 32, 34 tons of gully's away soil, in 0.22 ha. Extrapolating these values, considering 17 active years, the erosion rate achieved 8.65 t·ha<sup>-1</sup>·per year. Erodibility analyses indicated predominant medium textures, with less than 300 g/kg of silt and more than 50 g/kg of clay contents. These should be non-erodible soils; but, they present low porosity, soil organic matter content, and high compaction. Between both studied gullies, named as A and B, soil analysis results indicates major erosion susceptibility for study site A, than B. This hypothesis is outlined by qualitative analysis of some geotechnology products. Another important result includes the comparison between official vector base maps from IBGE and basin delimitation by SRTM images. They significantly differ in terms of geomorphology and may be study object by future researches. TLS generates the best quantitative results, as UAV and Google Earth Pro the qualitative ones. Conclusions indicate that both methods are complementary and may be part of all diagnosis wherever it is possible. Finally, there are some suggestions to continuing future research work, from the questions presented here.

**Key-words:** Erosion; Geotechnologies; Terrestrial Laser Scanner; Pirai river.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Triângulos texturais, em porcentagem. À esquerda, adaptação de Lemos e Santos (1996) do triângulo do Departamento de Agricultura dos EUA (USDA, 1993), à direita. Fonte: NEVES, 2015.

Figura 2 – Delimitação da área de estudo segundo dados de mapeamentos do IBGE e do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Guandú.

Figura 3 – Bacia do Alto rio Piraí inserida no contexto do Corredor Ecológico Tinguá-Bocaina e das Regiões Hidrográficas Guandu e Médio Paraíba do Sul.

Figura 4 – Equipe do Lagesolos no interior de voçoroca na Estrada que liga Angra dos Reis à Rio Claro-RJ, em maio de 2015. Foto: Hugo A. S. Loureiro.

Figura 5 – Nesta montagem, de maio de 2016, se vê muito material de solo que foi erodido na área da cabeceira da voçoroca, mas que ainda não foi completamente desagregado e transportado. Fotos: Antonio J. T. Guerra (2016).

Figura 6 – Barragem no rio Piraí, à esquerda, e entrada do Túnel de Tócos, à direita. Fonte: INSTITUTO TERRA, 2008.

Figura 7 – Visão na saída da voçoroca em dois momentos: (a) dezembro de 2015, com certa estabilidade; (b) maio de 2016, com a feição erosiva bastante alterada. Foto: Hugo A. S. Loureiro.

Figura 8 – Sub-bacias da Região Hidrográfica II – Guandu. Do limite com São Paulo, de oeste a norte, as quatro sub-bacias (Alto Piraí, Médio Piraí, Represa Santana e Sacra Família) compõem a delimitação da bacia hidrográfica do rio Piraí. Fonte: Castelo Branco, 2015.

Figura 9 – Represamento e desvio das águas do rio Piraí para o Sistema Guandu, marcando a divisão entre o alto e médio curso da bacia, com destaque para a drástica redução da vazão a jusante. Fonte: *Google Earth* – aquisição em 10/10/2017.

Figura 10 – Mapa geológico da área de estudos (LOUREIRO, 2018 adaptado de UERJ/CPRM, 2007).

Figura 11 – Seção Rio de Janeiro-Juiz de Fora, destacando as unidades estratigráficas predominantes na área de estudo (adaptado de Silva e Cunha, 2001).

Figura 12 – Mapa com unidades geomorfológicas presentes na bacia hidrográfica do Alto rio Piraí (LOUREIRO, 2018 adaptado de SILVA, 2002).

Figura 13 – Mapa de solos, destacando a presença de Latossolos na área de estudos (LOUREIRO, 2018 adaptado de CARVALHO FILHO *et al.*, 2003).

Figura 14 – Encosta durante aração morro abaixo, com trator circulando no reverso da vertente, em grande declividade, na bacia do Alto rio Piraí, em maio de 2016. Foto: LAGESOLOS, 2016.

Figura 15 – Na RJ-155, em direção à Lídice, placa de atrativo turístico indica a RPPN *Sítio Fim da Picada*. Acesso por estrada de terra logo após a placa. Foto: Hugo Alves S. Loureiro, 2015.

Figura 16 – Reprodução da Carta Imagem do Ortomosaico de Lídice, produzido pelo IBGE.

Figura 17 – Utilização do *drone* DJI Spark durante trabalho de campo em dezembro de 2017. No círculo vermelho a sombra do drone no momento da tomada da foto. No círculo amarelo, o smartphone acoplado ao controlador de voo do *drone*. Foto: Fabrizio Garritano (2017).

Figura 18 – Interior da voçoroca A teve o material encharcado por grande volume de chuvas no dia anterior ao escaneamento, impedindo que fosse seguro acessar, inclusive com equipamentos pesados. Foto: Hugo A. S. Loureiro (2018).

Figura 19 – Reprodução da representação esquemática realizada em trabalho de campo mostrando a posição relativa dos pontos A1, A2 e A3 na voçoroca A. Elaboração do autor.

Figura 20 – Fixados no solo com tripés, os alvos são obrigatórios para posicionar os dados no ambiente digital de processamento. No detalhe, o alvo do ponto A3, à direita da voçoroca. Na imagem da direita, Tainá e Kairo “bolhando” o alvo do ponto A1, à esquerda da voçoroca. Fotos: Diego Janoti (2018).

Figura 21 – Etapa de configuração de varredura do *Leica Laser Scanner*, definindo resolução, área e angulação para escaneamento. Fotos: Diego Janoti (2018); Hugo A. S. Loureiro (2018).

Figura 22 – Transferência dos dados de varredura do *Leica Laser Scanner* para pen drive. Fotos: Hugo A. S. Loureiro (2018).

Figura 23 – Junção das nuvens de pontos, primeira etapa de processamento. Setas brancas indicam o ponto onde estavam os alvos. Setas vermelhas indicam o ponto de onde o Scanner fez a varredura. Organizado pelo autor.

Figura 24 – Captura de tela após a junção das nuvens de A1, A2 e A3, com ativação do modo de cores reais. Note que o ponto A2 aparece junto às coordenadas espaciais X, Y, Z, indicando o ponto principal da varredura. Nota-se, também que a chuva é registrada a partir do ponto A1, à esquerda desta imagem.

Figura 25 – Análise granulométrica pelo método da pipeta. Na imagem, a etapa de decantação de silte e argila nas provetas de 1.000 mL. Foto: Hugo A. S. Loreiro, 2018.

Figura 26 – amostras volumétricas coletadas em anéis de 100 cm<sup>3</sup> durante análise em laboratório. Foto: Hugo A. S. Loureiro (2016).

Figura 27 – Blocos de solo do ponto QS1, com siglas de campo e laboratório, nas profundidades 10-20 e 0-10 cm, respectivamente. Foto: Hugo A. S. Loureiro (2018).

Figura 28 – Alguns passos da análise de estabilidade de agregados. Em A, peneiramento do bloco com leve destorroamento com as mãos, para restarem agregados maiores que 2 mm; em B, 25g de agregados pesados, separados em uma amostra para o cálculo da umidade e duas amostras para os dois jogos de peneiras; em C, as amostras recebem borrifadas de água pré-peneiramento úmido; em D, o processo de peneiramento úmido no aparelho de

Yoder; em E, os macro e microagregados em suas respectivas placas petri, após retirados de cada peneira; em F, diversas amostras de agregados na etapa de secagem à 40°C. Fotos: Hugo A. S. Loureiro (2018).

Figura 29 – Algumas etapas da análise química da matéria orgânica. Em A, 0,5 g de solo peneirado (ou 0,25 se diluído) com dicromato de potássio já fervido brandamente e adição do indicador difenilamina; em B, a difenilamina homogeneizada na solução ácida; em C e D dois ângulos e iluminações distintas para mostrar o processo de titulação enquanto se adiciona sulfato ferroso amoniacal; quando a solução muda da cor azul para a verde deve-se registrar o quanto do sulfato foi necessário gastar para processar a amostra.

Figura 30 – Incoerência cartográfica na delimitação de bacia hidrográfica, abrindo caminho para o aprimoramento dos estudos realizados nesta pesquisa em trabalhos futuros. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Figura 31 – Coleta no ponto FS1, em área de pasto acima da estrada, em propriedade vizinha à Fazenda Sant’Ana. À esquerda o topo do solo (0-10 e 10-20 cm) e à direita fragmentos de rocha a partir de 30 cm, com mudança de cor. Fotos: Hugo Alves S. Loureiro (2017).

Figura 32 – Pontos de coleta (em branco) e delimitação arbitrária de áreas com maior ação erosiva nas Voçorocas A e B (em vermelho). Destaque para a diferença de cobertura vegetal. Acervo: LAGESOLOS – VANT (2018 e 2017), por Fabrizio Garritano e Hugo Alves S. Loureiro.

Figura 33 – Ponto de coleta BS3, com vegetação se desenvolvendo bem, geração de serrapilheira e aporte de matéria orgânica. Foto: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Figura 34 – Esquematização de diferentes intervalos de porosidade total (PT), de acordo com diferentes estudos citados, mostrando a variação da porosidade do solo em diferentes condições e ambientes. No topo “Loureiro, 2019” refere-se a presente tese. Organização: Hugo Alves S. Loureiro.

Figura 35 – Modelo esquemático para cálculo da perda de solo na alcova de regressão de feição erosiva em Macaé (RJ). Adaptado de Loureiro (2013).

Figura 36 – Comparação da qualidade entre uma imagem de alta resolução espacial disponível no *Google Earth* e uma foto aérea registrada com VANT, para a área de estudo A. Foto: Fabrizio Garritano (2018).

Figura 37 – Mapeamentos de (a) hipsometria e (b) exposição/cobertura do solo, de Garritano *et al.* (2018a), a partir de imagens do VANT DJI MAVIC PRO 2018; e (c) fotografia aérea simples obtida para esta pesquisa, com o VANT DJI Spark. Foto: Fabrizio Garritano (2018).

Figura 38 – Manuseio da nuvem de pontos do LST no *software Leica Cyclone*. No detalhe, foto aérea do VANT utilizada no processamento. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018). Foto aérea: Fabrizio Garritano (2018).

Figura 39 – A imagem da direita é o resultado do processo que calcula volumes a partir do modelo TIN (ao centro), derivado da Ortoimagem (à esquerda). Nesta os “vazios” resultam de pontos não escaneados. Estes geram imprecisão no modelo TIN, que os preenche.

Figura 40 – Etapas finais de processamento dos modelos com recorte da voçoroca A, extraíndo curvas de nível e gerando sua hipsometria.

Figura 41 – Marcação do ponto comum n° 1 (*Pick 1*) na nuvem de pontos do LST e na imagem do VANT (no detalhe), no *software Cyclone*, para refinamento dos dados do escaneados.

Figura 42 – Processamento da nuvem de pontos do *Laser Scanner* Terrestre (varredura em 02/2018) com auxílio de imagem obtida com VANT (em 03/2018). Com fonte amarela e *check (v)* estão pontos de menor erro de precisão, que definem os pixels do mapa de textura. Exemplos: números 5 (vermelho), 8 (preto) e 10 (azul). Com fonte preta nas imagens e sem *check (v)* na tabela estão pontos de erros grosseiros, que invalidam o mapa de textura se acionados – com *check (v)* – na tabela. Exemplos: números 2 (amarelo) e 13 (roxo). Foto do VANT: Fabrizio Garritano (2018). Processamento e edição: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Figura 43 – Mapa de hipsometria da bacia hidrográfica do Alto rio Piraí (Município de Rio Claro – RJ).

Figura 44 – Mapa de declividade – em graus – da bacia hidrográfica do Alto rio Piraí (Município de Rio Claro – RJ).

Figura 45 – Mapa de forma das encostas da bacia hidrográfica do Alto rio Piraí (Município de Rio Claro – RJ).

Figura 46 – Mapa de comparação entre imagens de satélite do *Google Earth™* e trechos correspondentes do Ortofotomosaico do IBGE, para as áreas das voçorocas A e B.

Figura 47 – Mapa de feições erosivas lineares na bacia hidrográfica do Alto rio Piraí.

Figura 48 – Voçoroca A em sequência de imagens histórias do *Google Earth™*.

Figura 49 – Três momentos da voçoroca A registrados no recurso *Street View* do *Google Maps*. De cima para baixo: janeiro de 2012, março de 2015 e maio de 2017. A sequência das imagens mostra a colonização natural da vegetação no interior da voçoroca. Ela permanece ativa, porém seu crescimento se dá em menor velocidade, concentrando-se na cabeceira, principalmente pelo lado direito.

Figura 50 – Sequência de imagens históricas do *Google Earth*, dos anos de (a) 2001, (b) 2007, (c) 2012, (d) 2016 e (e) 2017, indicam feições estabelecidas desde 2001, com evolução reduzida ou pontual. Imagem do VANT (f), de dezembro de 2017, mostra qualidade bastante superior.

Figura 51 – A imagem de 2011 (à esquerda) define um pouco melhor os formatos da voçoroca B e realça, no limite inferior da imagem, o surgimento de voçoroca à jusante da Linha Férrea. Na imagem de 2017 (à direita), a posição do transecto horizontal (em vermelho) mostra que a definição da parede direita era clara no campo, local onde foi coletada a amostra BPD.

Figura 52 – Imagem de VANT (c) ajuda a destacar a localização de dois pontos na voçoroca B: local de onde partiu o transecto horizontal (a) e local de coleta na parede direita (b). Fotos: (a) e (b) Gabriel Nunes (2016). Foto aérea: Fabrizio Garritano (2017).

Figura 53 – Três momentos da voçoroca B capturados desde a RJ-155/BR-494 pelo recurso *Street View* do *Google*. De cima para baixo: agosto de 2012, março de 2015 e maio de 2017. A grande mudança não se dá no tamanho da voçoroca, mas no recobrimento de sua encosta em função de reflorestamento realizado pelo ITPA nos anos de 2016 e 2017, que não realizou quaisquer intervenções contra o processo erosivo.

Figura 54 – Linha Férrea desaparece, coberta por sedimentos oriundos da voçoroca B, confirmando que há atividade nesta feição. Fotos: Hugo Alves S. Loureiro (2016).

Figura 55 – Água e sedimentos saem da voçoroca B em direção à calha de águas pluviais. Esta drena para a parte inferior da encosta, abaixo dos trilhos, onde uma voçoroca se formou por esta falha do sistema de drenagem pluvial. No detalhe, em vermelho, mochila preta auxilia na orientação das imagens e em amarelo destaca-se um ponto de referência no interior da calha. Fotos: Hugo Alves S. Loureiro (2016).

Figura 56 – Imagens (a) e (b) com calha desobstruída. Estrutura rígida em (a) destruída por acidente de trânsito em (b) e recuperada com sacos em (d). Fotos (c) e (e) registram calha soterrada de material de VA, após chuvas volumosas em fevereiro de 2018. Na foto (f) a saída da calha, no outro lado da via, em outra voçoroca. Fotos: Hugo Alve S. Loureiro (a – 2016; d – 2017; c, f – 2018); Diego Janoti Suarez (e – 2018); *Google Street View*<sup>™</sup> (b – 2017).

Figura 57 – Voçoroca E prejudicando a estrada e gerando risco à segurança. Problema grave do sistema de drenagem da estrada em talude de aterro. À esquerda, na parte inferior da foto, a entrada da calha de um lado da estrada leva ao outro lado, com saída na voçoroca. Fotos: Hugo Alves S. Loureiro (2016 e 2017).

Figura 58 – Mapa de comparação entre imagens de satélite do *Google Earth*<sup>™</sup> e trechos correspondentes do Ortofotomosaico do IBGE, para as áreas das voçorocas do Posto Cascata (PC1 e PC2), acima, e das voçorocas D e K, esta em estrada rural, abaixo.

Figura 59 – Voçoroca K em três ângulos: panorâmico, abaixo (Fabrizio Garritano, 2018); e acima, desde o meio até o topo da estrada e o topo no detalhe (Rafael C. dos Santos, 2016).

Figura 60 – Nuvem de pontos (à esquerda) e imagem aérea do VANT DJI Spark (à direita). Dos dados obtidos pelo LST foram derivados diversos produtos analíticos, quantitativos e qualitativos. Da imagem digital em alta resolução foram possíveis apenas análises qualitativas. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018). Foto: Fabrizio Garritano (2018).

Figura 61 – Reprodução do modelo resultante dos processamentos para cálculo de área ( $m^2$ ) e volume ( $m^3$ ) da voçoroca A. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Figura 62 – Reprodução do modelo tridimensional de hipsometria, derivado da geração de curvas de nível (linhas brancas) a partir da nuvem de pontos do LST. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Figura 63 – Reprodução do modelo tridimensional de hipsometria, com destaque para os principais pontos cotados das curvas de nível (linhas finas brancas limitando a mudança entre as cores). Nota-se que as curvas de nível apresentam valores negativos, indicando que se referem a um terreno abaixo da superfície original da encosta. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Figura 64 – Medição de seções da voçoroca A. Números brancos foram editados para destacar ponto a ponto os transectos virtuais do *software Leica Cyclone*. Números em verde correspondem aos respectivos *point-point* de acordo com a tabela de mensurações. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Figura 65 – Medição de seções da voçoroca Q. Números em verde correspondem aos respectivos transectos (*point-point*), de acordo com a tabela de mensurações. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Figura 66 – Nuvem de pontos processada no *software Leica Cyclone*, visualizada no modo “pontos transparentes” por diferentes ângulos, conferindo imagens com bom nível de realismo, de representação fidedigna. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Figura 67 – Fotografia aérea do VANT focalizando a cabeceira da voçoroca A, em dezembro de 2018. Seta destaca caminho preferencial da água. Foto: Fabrizio Garritano (2018).

Figura 68 – Grande acúmulo de material erodido em fevereiro se mantém em março de 2018, ao longo das áreas de acostamento e de parte da pista próximo à saída da voçoroca. No canto superior esquerdo, Fiat Dobló da UFRJ serve de escala. Foto: Fabrizio Garritano (2018).

Figura 69 – Voçoroca A e RJ-155/BR-494 em dezembro de 2017 (à esquerda) e março de 2018 (à direita). Foto: Fabrizio Garritano (2017 e 2018).

Figura 70 – Faixa de rolamento no sentido Angra dos Reis completamente coberta por solo erodido da voçoroca A e acúmulo nos acostamentos. Foto: Diego Janoti Suarez (2018).

Figura 71 – Vista a partir da lateral esquerda da voçoroca A, com a estrada tomada de sedimentos. Foto: Diego Janoti Suarez (2018).

Figura 72 – Foto panorâmica mostra a saída da voçoroca junto à estrada RJ-155/BR-494 com visão impressionante da quantidade de material mobilizado e atrapalhando bastante a segurança da via. A calha de drenagem ficou soterrada. Foto: Diego Janoti Suarez (2018).

Figura 73 – Nota-se no solo o direcionamento dos fluxos. Foto: Diego Janoti Suarez (2018).

Figura 74 – Superior: foto de março de 2018 mostra o grande acúmulo de solo erodido pela voçoroca A. Inferior: parte da nuvem de pontos mostrando os sedimentos acumulados na pista. Foto: Domyinique Santos (2018).

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frações granulométricas de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) na escala de Atterberg. Fonte: LOUREIRO, 2010.

Tabela 2 – Efeito do comprimento de rampa, com declividades entre 6,5 e 7,5%, para médias de chuva de 1.300 mm. Fonte: PEREIRA, 2015, modificado de Bertoni e Lombardi Neto (2010).

Tabela 3 – Total e distribuição da quantidade de amostras por tipo, deformadas e volumétricas, em cada ponto de coleta nos diferentes sítios.

Tabela 4 – Médias das propriedades físicas e química por ponto de coleta.

Tabela 5 – Resultados das análises físicas e química para as paredes da área A.

Tabela 6 – Resultados das análises físicas e química para as paredes da área B.

Tabela 7 – Resultados das análises físicas e química para os pontos coletados na superfície das encostas (0-10 e 10-20 cm).

Tabela 8 – Resultados das análises de Estabilidade de Agregados, segundo adaptações de Yoder (1936) por Cesário *et al.* (2010), Donagemma *et al.* (2011) e Rangel (2014).

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações do *drone* DJI Spark utilizado nesta tese e do modelo usado em Garritano *et al.* (2018a,b). Elaboração do autor.

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AGEVAP – Agência da Bacia do Rio Paraíba do Sul

ANA – Agência Nacional de Águas

APA – Área de Proteção Ambiental

APP – Área de Preservação Permanente

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CBH – Comitê de Bacia Hidrográfica

CEDAE – Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CPRM – Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)

DMG – Diâmetro Médio Geométrico

DMP – Diâmetro Médio Ponderado

DS – Densidade do Solo

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAPERJ – Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

GEOCART – Laboratório de Cartografia

GLASOD - *Global Assessment of Soil Degradation*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IDAF – Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Estado do Espírito Santo

IEA – Índice de Estabilidade de Agregados

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo

INEA – Instituto Estadual do Ambiente

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ITPA – Instituto Terra de Preservação Ambiental

LAGESOLOS – Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação dos Solos

*LiDAR – Light Detection and Ranging*

LST – *Laser Scanner Terrestre*

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital do Terreno

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MOS – Matéria Orgânica do Solo

MSc. – Mestre/Mestra

ONG – Organização Não-Governamental

PAF – Produtor de Água e Floresta

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PEC – Parque Estadual Cunhambebe

PMRC – Prefeitura Municipal de Rio Claro

PNSB – Parque Nacional da Serra da Bocaina

PPGG – Programa de Pós-Graduação em Geografia

PSA – Pagamento por Serviços Ambientais

PT – Porosidade Total

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

RPPN – Reserva Particular do Patrimônio Natural

SEA – Secretaria Estadual do Ambiente

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

*SRTM – Shuttle Radar Topography Mission*

*TLS – Terrestrial Laser Scanner*

*TNC – The Nature Conservancy*

*UAV – Unmanned Aerial Vehicle*

UC's – Unidades de Conservação

UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UHE – Usina Hidrelétrica

USDA – *U. S. Department of Agriculture* (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)

VANTs – Veículos Aéreos Não Tripulados

*WEPP – Water Erosion Prediction Project Model*

**LISTA DE SÍMBOLOS**

@ – arroba

ha –hectare(s)

$x/y$  – divisão de “x” por “y”

$x \cdot y$  – multiplicação de “x” por “y”

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	24
1.1. Justificativas .....	27
1.2. Objetivos .....	29
1.2.1. Geral .....	29
1.2.2. Específicos .....	29
2. REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL .....	30
2.1. Geomorfologia e erosão dos solos .....	30
2.1.1. Estudos experimentais, monitoramentos e diagnósticos .....	33
2.1.2. O processo erosivo hídrico .....	36
2.1.3. Fatores controladores da erosão .....	40
2.1.3.1. Erodibilidade dos solos – propriedades físicas e químicas .....	40
2.1.3.2. Erosividade .....	47
2.1.3.3. Características das encostas .....	50
2.1.3.4. Cobertura vegetal .....	53
2.2. Técnicas aplicadas ao estudo da erosão .....	59
2.2.1. Estacas e Pinos de erosão .....	61
2.2.2. Geotecnologias no estudo da erosão .....	64
2.2.2.1. Imagens de satélite .....	66
2.2.2.2. <i>Google Earth</i> .....	68
2.2.2.3. <i>Laser Scanner</i> Terrestre – LST ( <i>Terrestrial Laser Scanner – TLS</i> ) .....	71
2.2.2.4. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) .....	73
3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDOS .....	77
3.1. Caracterização e histórico de uso e ocupação .....	77
3.1.1. Histórico socioeconômico da área .....	84
3.2. Clima .....	86
3.3. Geologia .....	87
3.4. Geomorfologia .....	91
3.5. Solos .....	94

3.6. Vegetação .....	96
3.6.1. <i>Produtores de Águas e Florestas</i> – Pioneirismo de PSA no Rio de Janeiro ...	101
4. METODOLOGIA .....	104
4.1. Escalas de análise e recorte espacial para estudo .....	104
4.2. Levantamento bibliográfico e de bases cartográficas .....	105
4.2.1. Imagens disponíveis e utilizadas: caminhos para obtenção .....	106
4.3. Elaboração de mapas temáticos no <i>software ArcGIS</i> .....	109
4.4. Monitoramento das voçorocas .....	112
4.4.1. Imagens obtidas com VANT ( <i>Drone</i> ) .....	112
4.4.2. Uso de <i>Laser Scanner</i> (LST) .....	114
4.5. Coletas de amostras de solo e análises em laboratório .....	121
4.5.1. Granulometria e Textura .....	122
4.5.2. Densidade do Solo, Densidade de Partículas e Porosidade .....	123
4.5.3. Estabilidade de Agregados .....	124
4.5.4. Teor de Matéria Orgânica .....	127
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	129
5.1. Erodibilidade do solo .....	130
5.2. Monitoramento: de estacas e pinos ao uso de geotecnologias .....	149
5.3. Diagnóstico da erosão .....	161
6. CONCLUSÕES .....	195
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	199

## **1. INTRODUÇÃO**

A degradação dos solos é um grave problema enfrentado em qualquer parte do mundo. A alteração e redução da qualidade dos solos impactam de variadas maneiras as atividades humanas, sejam elas econômicas, culturais, ou de ocupação de uma determinada área (MORGAN, 2005; ARAÚJO *et al.*, 2009; GUERRA *et al.*, 2017; POESEN, 2018; MUSHI *et al.*, 2019; XIONG *et al.*, 2019). Por definição, a degradação é considerada um problema social, uma vez que os processos naturais, que ocorrem com e sem as interferências humanas (a exemplo: lixiviação, erosão, movimentos de massa e cheias), para serem identificados como “degradação” são carregados de critérios sociais, porque relacionam as terras aos seus usos em curso ou aos seus potenciais usos diversos (BLAIKIE e BROOKFIELD, 1987; CUNHA e GUERRA, 2006; GUERRA *et al.*, 2017; POESEN, 2018; MUSHI *et al.*, 2019).

A erosão dos solos é um grande problema ambiental no mundo, processo ao mesmo tempo natural da geomorfologia e de degradação das terras, que gera danos significativos no local (*onsite*) e possui consequências sérias fora do local de origem (*offsite*), entre os quais podem ser citados: redução da fertilidade e produtividade do solo em áreas cultiváveis; redução na qualidade da água de corpos hídricos diversos, como lagoas e rios, com aumento da turbidez, por exemplo; assoreamento de rios, lagos e reservatórios; entre outros problemas associados aos sedimentos que produz (LABRIERE *et al.*, 2015; POESEN, 2018; LOBO e BONILLA, 2019; MUSHI *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019; XIONG *et al.*, 2019). As voçorocas, forma de erosão mais grave, podem danificar, ainda, infraestruturas, como rodovias, ruas, pontes, prédios, em áreas rurais e urbanas (POESEN, 2018; YIBELTAL *et al.*, 2019).

Encostas impactadas por processos geomorfológicos, como a erosão e os movimentos de massa, que não se tenha conhecimento de sua dinâmica e de suas características hidrológicas, pedológicas e geológicas, resultam em medidas de recuperação bastante dificultosas e subestimam ou superestimam os custos das obras, por atuarem somente sobre as consequências do processo, podendo levar ao insucesso das ações de mitigação destes processos, que se constituem muitas vezes como desastres naturais (ARAÚJO *et al.*, 2009; CUNHA e GUERRA, 2006; GUERRA *et al.*, 2017).

Por isso, é fundamental que ações de recuperação de áreas degradadas considerem as etapas de monitoramento e diagnóstico da degradação, para direcionar as práticas adequadas à recuperação do problema em questão. Sem o cumprimento destas etapas não se realiza recuperação e/ou reabilitação bem sucedida (CUNHA e GUERRA, 2006; ARAÚJO *et al.*, 2009; LOUREIRO, 2013; GUERRA *et al.*, 2017; LOBO e BONILLA, 2019).

Identificar os mecanismos da erosão é fundamental para elaborar projetos de controle da erosão, e os riscos inerentes à degradação ambiental e aos impactos das feições criadas pelo processo, como por exemplo, as voçorocas, pedem pesquisas que apoiem decisões sobre a recuperação de áreas degradadas (OLIVEIRA, 2005; GUERRA *et al.*, 2017).

A presente tese propõe realizar experimentos de campo para diagnosticar áreas degradadas por erosão hídrica dos solos. O desenvolvimento da pesquisa se dá com base, inicialmente, partindo dos estudos de Loureiro (2013), como forma de dar continuidade e aprofundamento àqueles, porém em área de estudo bastante distinta. Enquanto o referido trabalho se deu em ambiente com intensa degradação dos solos, na região serrana de Macaé, norte do Estado do Rio de Janeiro, a atual pesquisa volta atenção para a cadeia serrana interiorana da chamada “Costa Verde” – que abrange os Litorais Sul Fluminense e Norte Paulista – que faz parte do Médio Vale do rio Paraíba do Sul, onde se insere a bacia hidrográfica do Alto rio Piraí. Situada no município de Rio Claro (RJ), tem posição estratégica no abastecimento de água para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro e no seu fornecimento de energia elétrica. Relacionando-se diretamente com duas importantes Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro: Guandu e Médio Vale do Paraíba do Sul.

O ponto de evolução entre a pesquisa passada e a atual converge para o uso das geotecnologias em contraponto aos métodos manuais de monitoramento como estacas e pinos. Semelhante aos trabalhos de Bonilla (2008), Solé-Benet *et al.* (2012) e Etchelar (2017), o presente estudo se utiliza de variadas técnicas digitais para buscar o mesmo produto: estimativas da erosão que possam ser instrumentos de monitoramento e diagnóstico da erosão por voçorocas. As geotecnologias evoluem, contribuindo com maior requinte e praticidade para com as análises e trabalhos de campo, servindo de instrumento ao trabalho dos geógrafos, que ganham maneiras de interpretar o espaço geográfico em sua diversidade de formas, usos e processos (LOUREIRO e FERREIRA, 2013).

São inúmeros os artigos científicos que trazem a erosão como tema principal, o que poderia indicar que pouco conhecimento ainda falta ser adicionado. Porém, conforme Poesen (2018) há muitas lacunas que ainda precisam de respostas, o que torna o assunto pertinente cientificamente. Há que seguir melhorando na compreensão de processos naturais e antrópicos e suas interações, no estudo espaço-temporal dos processos e taxas de erosão, e nas técnicas e estratégias inovadoras que busquem redução e prevenção do processo erosivo (POESEN, 2018; MUSHI *et al.*, 2019). Os próprios modelos até aqui gerados para prever subprocessos do voçorocamento ou as taxas de erosão em voçorocas em diversos ambientes, ainda não são confiáveis ou validados e replicáveis de forma eficaz o bastante para prever efeitos de mudanças ambientais neste tipo de erosão, ou seja, segue importante área de pesquisa, que demanda esforços constantes (POESEN, 2018).

Nesse sentido, Goudie (2018) coloca que nos últimos 50 anos um dos pontos de desenvolvimento dos estudos geomorfológicos foi a disseminação e uso de diversas técnicas, entre elas: fotografias de campo e aéreas sequenciais, sensoriamento remoto sequencial, mapas sequenciais, monitoramento de longo prazo (com *data loggers*) e modelagens numéricas (computadores). Além disso, o humano se tornou um agente de mudança geomorfológica cada vez mais importante nas análises recentes (GOUDIE, 2018). Não à toa, na maioria dos casos, a erosão por voçorocas é acelerada por superpastejo, mudanças de uso da terra e práticas agrícolas inapropriadas, ou ainda, eventos climáticos extremos, que ocorrem em função da ação humana devastadora sobre o planeta (POESEN *et al.*, 2003; VALENTIN *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2019; YIBELTAL *et al.*, 2019).

As técnicas empregadas ao longo desta tese podem ser relevantes, inclusive, para as novas questões que surgem no cenário científico geomorfológico que vem se debruçando sobre possíveis influências das mudanças climáticas no tocante aos processos erosivos acelerados (POESEN, 2018). Este mesmo autor cita as lacunas na compreensão de fatores e mecanismos que afetam as taxas erosivas em ambientes que receberam menor atenção na literatura mundial, como as áreas tropicais. Nestas compreender melhor o controle da erosão do solo é vital (LABRIERE *et al.*, 2015).

### 1.1. Justificativas

A degradação dos solos se origina a partir de uma série de processos complexos. Estes podem ser o aumento da desertificação, os movimentos de massa, a contaminação dos solos e a erosão (FULLEN e CATT, 2004; GUERRA, 2014; GUERRA *et al.*, 2014; LABRIERE *et al.*, 2015; GUERRA *et al.*, 2017). Esta última é uma das principais formas de degradação do solo, iniciada pela perda de sua camada superficial (ARAÚJO *et al.*, 2013). A remoção e o transporte das partículas do solo pelo salpicamento e pelo escoamento superficial (*splash* e *runoff*), além do rompimento da estabilidade da massa de solo, comprometem a conservação do solo e da água, degradando a paisagem (PORTELA *et al.*, 2010; GUERRA, 2014; MUSHI *et al.*, 2019).

O reverso das escarpas da Serra do Mar, no Sul Fluminense, representa uma área sensível em termos de conservação. Representa o Vale do Rio Paraíba do Sul, de extrema importância para a Região Sudeste, detentora de um histórico de ocupação e ciclos econômicos que converteram grandes extensões da Mata Atlântica em áreas de cultivo e, principalmente hoje, pastagens extensivas (XAVIER e COELHO NETTO, 2014). O reflexo disso é a extrema fragmentação florestal e a formação de efeitos de borda (INEA, 2015), que podem prejudicar a geodiversidade e o geoturismo (SANTOS FILHO *et al.*, 2015). Em se tratando de pastagens, cerca de 50 a 60% das áreas de pasto brasileiras (e muitas no mundo) possuem algum grau de degradação e ainda são poucos os pecuaristas que investem de alguma maneira na recuperação ou conservação de suas terras, ou mesmo os que estejam preocupados com esse tipo de situação (ZHOU *et al.*, 2010; ANTONELI *et al.*, 2012; LOBO, 2012;), o que em muitos casos é alarmante.

Pensar meios de recuperação de áreas degradadas, em especial por atividades agropecuárias, constitui ação muito importante, seja por questões econômicas, de preservação, ou conservação da natureza. Para isso devem ser feitos diagnósticos, exigindo do estudo básico, acadêmico, levantamentos sistemáticos a partir de monitoramentos das diversas formas de degradação (CUNHA e GUERRA, 2006; GUERRA e MARÇAL, 2006; ANTONELI *et al.*, 2012; SAXTON *et al.*, 2012; WIRTZ *et al.*, 2012; ANDRADE *et al.*, 2014; RENZ *et al.*, 2014; FERREIRA, 2015; ZANGIROLAMI *et al.*, 2015). Nesse caminho se conhece a dinâmica dos processos e se aponta porque ocorrem de tal modo, porque e como as formas

resultantes são geradas e as suas consequências. Com isso, identificados os aspectos que demandam maior atenção e cuidado, se pode determinar o “onde?” e o “como?” recuperar (LOUREIRO, 2013).

Desta forma, a pesquisa aplicada em Geomorfologia envolve-se de forma direta com a coleta e análise de dados geomorfológicos, em função de objetivos para o uso do solo. Insere-se nos procedimentos de planejamento, manejo e tomada de decisão acerca de potencialidades para atividades como ocupação; produção, a exemplo da agropecuária; recreação, a exemplo dos tipos de turismo; e conservação, como as áreas protegidas e as áreas de patrimônios geológicos e geomorfológicos (SLAYMAKER, 2010; GUERRA e JORGE, 2014).

Portanto, conhecer as ferramentas disponíveis para a análise dos processos erosivos é fundamental. Cada ator envolvido com processos erosivos sejam pesquisadores, gestores ou proprietários de terras, por exemplo, devem utilizar técnicas de monitoramento e controle da erosão de acordo com suas possibilidades. Abordar o mapeamento em escalas locais a regionais por meio de dados de satélite de média a alta resolução é comum a estudos de sensoriamento remoto (D’OLEIRE-OLTMANN *et al.*, 2012). Contudo, segundo estes autores, quando se trata da erosão por voçorocas, medir, monitorar e compreender seus processos em escala local detalhada traz dificuldades metodológicas, em face das variadas escalas espaciais e variabilidade temporal de sua ocorrência. Esses mesmos autores traçam objetivos no uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para levantamentos de áreas erodidas por voçorocas, que podem ser aplicados também a métodos de escaneamento terrestre a *laser*: (1) monitorar feições erosivas em alta resolução, em escala local; (2) detalhamento na análise do entorno utilizando a variação de escalas, local a regional; e (3) gerar mapas digitais de detalhe e modelos que quantifiquem área e volume das feições, valendo-se, ainda, da análise de mudanças a partir de séries temporais.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo principal traçar um diagnóstico da erosão em encostas com voçorocamento, a partir do levantamento e verificação das capacidades de diferentes métodos de aquisição e tratamento de dados, desde os mais tradicionalmente empregados para estes estudos até os mais recentes e modernos.

### **1.2.2. Específicos**

- Identificar e mapear a ocorrência de voçorocas no alto curso da bacia do rio Pirai, conjugando o uso de geotecnologias e trabalhos de campo;
- Determinar propriedades físicas e químicas dos solos das áreas degradadas por erosão;
- Aplicar técnicas de monitoramento da erosão, em feição erosiva relacionada à agropecuária, para analisar padrões e processos;
- Avaliar as maneiras como essas técnicas puderam e podem ser utilizadas (vantagens e desvantagens). Apontando correções ou complementos em seus usos, agregando qualidade, reduzindo deficiências e constituindo alternativas viáveis de uso, por parte de gestores e planejadores ambientais.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL**

### **2.1. GEOMORFOLOGIA E EROÇÃO DOS SOLOS**

A degradação ambiental tem sido estudada pelos mais diversos ramos do conhecimento, de acordo com as especialidades de cada pesquisador. É tida como um problema social, já que os processos naturais, com e sem as interferências humanas (exemplos: lixiviação, erosão, movimentos de massa e cheias) são carregados de critérios sociais, pois relacionam as terras e seus usos em curso ou seus potenciais usos diversos (BLAIKIE e BROOKFIELD, 1987; CUNHA e GUERRA, 2006; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016).

As respostas geomorfológicas provocadas pelas mudanças no uso da terra ampliam a vulnerabilidade das áreas a altas taxas de erosão (PELACANI *et al.*, 2008 *in* OUYANG *et al.*, 2018). Assim sendo, estudar os processos, primordiais para explicar a dinâmica das paisagens, tornou-se um dos principais objetivos da Geomorfologia (THOMAZ e ROSS, 2006). Como mencionam Suertegaray e Nunes (2001), a pesquisa geomorfológica atual se preocupa mais com questões ambientais de cunho pontual, quer dizer, relacionadas à morfodinâmica, deixando a característica anterior, mais descritiva e genética, relacionada à morfogênese.

Assim, conforme Silva *et al.* (2015), a Geomorfologia tem oferecido importantes contribuições a análises de fragilidade e vulnerabilidade ambientais, ao ordenamento do território, zoneamento ambiental, gestão de bacias hidrográficas e recursos hídricos, recuperação de áreas degradadas, entre outras aplicações. Ou seja, a Geomorfologia busca compreender, de maneira integrada, a evolução espacial e temporal dos processos atuantes no modelado terrestre, com vistas às intervenções antrópicas (GUERRA e MARÇAL, 2006). Nesse sentido, para Ross (2007 *in* SILVA *et al.*, 2015), a face aplicada da Geomorfologia tem posição destacada entre as ciências da natureza, devido a sua importância na análise do quadro ambiental, sendo este um espaço eminentemente geográfico.

Segundo o *Global Assessment of Soil Degradation* (GLASOD) – Projeto de Avaliação Mundial da Degradação do Solo – do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, os cinco principais fatores de degradação dos solos são: 34,5% superpastejo da vegetação; 29,4% desmatamento ou remoção de cobertura vegetal natural; 28,1% atividades agrícolas e

sua variedade de práticas; 6,8% exploração intensiva da vegetação, expondo o solo à erosão; e 1,2% atividades industriais ou bioindustriais, que poluem o solo. Para a América do Sul, o mesmo estudo aponta que a degradação se origina em 41% do desmatamento, 27,9% do superpastejo e 26,2% da agricultura. No início deste século se estimava a destruição ou grave degradação de 1,1 milhão de hectares de florestas tropicais secundárias no mundo, devido à expansão agropecuária, mineração e construção de barragens, estradas e ferrovias (ANDRADE *et al.*, 2003). Já em 2018, foi registrada perda de 12 milhões de hectares de florestas tropicais primárias em todo o mundo, área correspondente à Bélgica, sendo o Brasil o líder do ranking, com mais de 1,3 milhão de hectares em área total (<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/04/mundo-perde-area-do-tamanho-da-belgica-em-florestas-tropicais-primarias-em-2018>; <https://www.dw.com/pt-br/brasil-foi-pa%C3%ADs-que-mais-perdeu-florestas-tropicais-nativas-em-2018/a-48489812>; acessos em 22/06/2019).

Mesmo a ausência de estudos exatos ou conclusivos quanto à extensão da degradação dos solos no Brasil, estimativas apontam como maiores responsáveis: atividades agropecuárias e desmatamento (TAVARES *et al.*, 2008). Ou seja, a principal causa da degradação do solo é o manejo inadequado (BLAIKIE e BROOKFIELD, 1987; GERRARD, 1990; MORGAN, 2005; DANIELS e HAMMER, 1992 *in* CUNHA e GUERRA, 2006; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016).

Dessa maneira, as mudanças de uso da terra e o desmatamento, seja em áreas rurais ou urbanas, têm papéis importantes nos processos que atuam nas encostas, que poderão ser acentuados pelas mudanças climáticas (FAVIS-MORTLOCK e GUERRA, 1999; FULLEN e CATT, 2004; GUERRA *et al.*, 2017). Entre estes processos geomorfológicos estão a erosão e os movimentos de massa, duas formas de degradação do solo, que contam com importante papel dos humanos, constituindo-se problemas globais, presentes em muitos países (GUERRA *et al.*, 2017; OUYANG *et al.*, 2018; POESEN, 2018). Este último autor elenca diversos outros estudos que demonstraram o aumento das taxas de erosão por todo o mundo durante o Antropoceno, devido às principais mudanças no uso da terra.

Com papel vital na vida cotidiana, os solos são um recurso natural que oferece vários serviços e bens ecossistêmicos de apoio, fornecimento, regulação e cultura (POESEN, 2018). Dentre seus processos de degradação, a erosão foi identificada como a ameaça mais grave,

segundo o Relatório sobre o Estado dos Recursos do Solo do Mundo, do Painel Técnico Intergovernamental sobre Solos (FAO e ITPS, 2015; MONTANARELLA *et al.*, 2016 *in* POESEN, 2018).

Entre os vários agentes erosivos, o mais importante é a água (GUERRA *et al.*, 2017). Segundo estes autores, há diferentes classificações de erosão do solo, de acordo com a região onde ocorrem e os tipos de solo presentes, com o regime de precipitação, características das encostas e o uso e manejo da terra. Logo, nas áreas tropicais, de tempestades que podem ser muito intensas, a erosão dá sinais claros, com rios cheios de sedimentos durante o evento chuvoso e a possibilidade de causar assoreamento (SELBY, 1993; FULLEN e CATT, 2004; MORGAN, 2005; GUERRA *et al.*, 2015 e 2017; LABRIÈRE *et al.*, 2015).

A erosão tem efeitos no local onde ocorre e fora dele, efeitos estes conhecidos internacionalmente como *on-site* e *off-site*: por exemplo, o primeiro reduz a qualidade do solo (POESEN, 2018) e o segundo pode ser representado pelos sedimentos transportados que causam assoreamento nos rios, lagos e reservatórios (NACINOVIC *et al.*, 2014; GUO *et al.*, 2015; GUERRA, 2016; GUERRA *et al.*, 2017; POESEN, 2018).

Com relação ao estudo de voçorocas, Ireland *et al.* (1939), reconhecido como um dos pioneiros no tema (CASTILLO e GOMEZ, 2016), afirmaram que o voçorocamento é diretamente associado ao uso da terra pelo homem, que pode ser erodida desastrosamente se usada de modo inapropriado. Este autor reiterou que, mesmo onde o uso da terra é correto, se a drenagem não for controlada de maneira apropriada, a erosão acelerada pelo escoamento concentrado representa um perigo.

O desenvolvimento das voçorocas, normalmente, ocorre por uma variedade de processos, cujas interações controlam as taxas e os estilos de desenvolvimento, de acordo com as tendências erosivas e de estabilização (HARVEY, 1992). FULLEN e CATT (2004) diferenciam que, enquanto as ravinas tendem a realizar incisões no solo em horizonte A, principalmente, as voçorocas atingem com facilidade os horizontes B e C.

Para Poesen (2018), apesar do grande número de pesquisas sobre os processos da erosão (seus fatores controladores, consequências, prevenção e controle) e de o número de

artigos ter aumentado quase sete vezes entre 1980 e 2017, concluir que já se saiba quase tudo sobre o tema é facilmente refutável. Segundo o autor, isto se deve a lacunas existentes, inclusive porque há ambientes que receberam atenção mais limitada, como os tropicais e subtropicais. Castillo e Gomez (2016) concordam que há lacunas, ao afirmarem que a erosão por voçorocas se tornou um campo de crescente interesse na comunidade científica, mas que responde por apenas cerca de 10% das pesquisas de erosão, porcentagem em desacordo com a pior forma de degradação do solo em áreas agrícolas. Estas lacunas pedem atenção à melhor compreensão dos fatores que controlam os processos de erosão natural e antropogênica e suas interações, a um escalonamento de processos e taxas no espaço e no tempo, e às técnicas e estratégias inovadoras que evitem, ou reduzam as taxas de erosão (POESEN, 2018).

O geomorfólogo, para compreender a evolução espaço-temporal dos processos do modelado terrestre, deve ter atenção à intervenção humana, que pode acelerar tais processos, em prazos de décadas até séculos e milhares de anos comparados ao modo natural (CUNHA e GUERRA, 2006; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016). A maior ou menor estabilidade das formas de relevo advém de tendências evolutivas e possíveis interferências do próprio ambiente, ou da ação antrópica (MARQUES, 2001 *in* ARAÚJO *et al.*, 2013). Assim, as geociências, de forma geral, passam a ser vistas como “instrumentos aplicados” para a melhoria de previsões e criação de gestão ambiental mais eficaz (VON ELVERFELDT, 2012).

### **2.1.1. Estudos experimentais, monitoramentos e diagnósticos**

A geomorfologia é uma ciência baseada no conceito de tempo, pois as escalas temporais são fundamentais para a natureza de suas investigações (RHOADS e THORN, 1993 *apud* FURLANI e NINFO, 2015). Conforme alguns autores apontam (BOARDMAN e FAVIS-MORTLOCK, 2014; GUERRA, 2016), para que os processos erosivos se iniciem, existe uma “janela de oportunidade para a erosão”, que depende do momento, quantidade e intensidade da chuva em um dado ano; da data inicial e da duração dessa “janela”; e das características do solo e morfológicas da área.

Tanto o principal objetivo geomorfológico atual, de analisar processos da superfície terrestre, estes possuidores de um caráter dinâmico (“fisiologia da paisagem”), quanto o objetivo anterior, de descrever a paisagem de modo explicativo, com seu caráter estático (“anatomia da paisagem”), requerem dados um do outro (PENTEADO, 1978). Para que se obtenham tais dados sobre a realidade, utilizam-se as técnicas, que embasam os caminhos realizados pelo método (VENTURI, 2009). Este autor explica que o método seria o “plano do pensar”, organizando o raciocínio dos pesquisadores de acordo com uma fundamentação teórica, e que as técnicas seriam o “plano do fazer”, ao organizarem informações que alimentam a pesquisa.

Em termos de qualidade dos dados, é importante frisar, os erros podem ser inevitáveis, apesar da atenção e cuidado empregados (MARQUES, 1996). Ao pesquisar áreas degradadas, Stocking (1987) afirmou que a própria coleta de dados é uma provável fonte de erros, ao considerar alguns tipos de medições e monitoramentos que sejam de grande dificuldade. Alguns erros são aceitáveis, enquanto outros invalidam os trabalhos, sendo de grande importância que o pesquisador, além de reduzi-los, possa identificá-los e explicitá-los, a fim de aferir os valores do trabalho realizado, deixando aberta a possibilidade de contribuições à sua evolução (MARQUES, 1996) ou mesmo constituí-los enquanto resultado e objeto de futuras investigações acadêmico-científicas ou técnicas.

Segundo Guerra *et al.* (2017), há várias formas de monitorar e investigar a erosão, com a finalidade de determinar a perda de solo dos ambientes, como as bacias hidrográficas. Essa determinação de taxas de erosão do solo obteve esforços extraordinários ao longo do último século, em variadas condições climáticas e de uso da terra, a partir de diversos métodos de medição (GARCIA-RUIZ *et al.*, 2015). Estas taxas são estabelecidas em função da massa de solo mobilizada, ou sedimentos, por unidades de área e tempo, expressa em toneladas por hectare por ano ( $t \cdot ha^{-1} \cdot ano$ ) (GARCIA-RUIZ, 2015; GUERRA *et al.*, 2014; 2017; POESEN, 2018).

A pesquisa em erosão dos solos, sobretudo por voçorocas, ainda tem necessidade de esforços de investigação, estudos de monitoramento, experimentos e modelagem, com séries de dados mais longas e consistentes, combinação de metodologias de pesquisa, padronização de métodos de medição e orientações para relato e interpretação de

resultados, que permitam sua comparação e compreensão, bem como um controle mais eficaz e disseminação mais ampla na comunidade acadêmico-científica (GARCIA-RUIZ *et al.*, 2015; CASTILLO e GOMEZ, 2016; GUERRA *et al.*, 2017; POESEN, 2018). Além disso, há que se considerar a melhoria de previsões dos efeitos da mudança ambiental nas taxas de voçorocamento e a identificação de limiares críticos de chuva, topografia, solos, uso da terra e hidráulica de fluxo para o desencadeamento, desenvolvimento e estabilização de voçorocas nos diferentes ambientes (POESEN, 2018).

De acordo com Castillo e Gomez (2016), que fizeram um levantamento de 100 anos de estudos de erosão por voçorocas, a maioria das pesquisas se concentra em estimar quantitativamente as taxas de degradação, ou analisar que fatores são responsáveis por sua ocorrência. Verificaram, também, que foram mais frequentes as estimativas de curto prazo (até cinco anos), seguidas de estudos de longo prazo (mais de 15 anos) baseados, principalmente, na interpretação de ortofotografias.

Garcia-Ruiz *et al.* (2015), analisando o tempo de realização de estudos sobre taxas de erosão em geral, verificaram que a maioria durou apenas um ano, considerando tempo muito curto para estimativas confiáveis a longo prazo, sendo seguido por estudos de 10 anos, quando realizados em parcelas de erosão, e 2 a 10 anos quando em bacias hidrográficas. Os autores lamentam que sejam raros experimentos com mais de 10 anos e que ainda menos estudos ultrapassaram 25 anos de duração.

Até o ano de 2005, os principais tópicos nos estudos sobre voçorocas foram as taxas de erosão, fatores e processos, sendo sucedidos por grande quantidade de abordagens metodológicas, relacionadas a técnicas de medição, limites e morfologia das feições e erros de levantamento, incluindo, também, a aplicação de técnicas inovadoras de sensoriamento remoto (CASTILLO e GOMEZ, 2016).

Poesen (2018) reconhece que houve diversas tentativas de se desenvolver modelos com base nos processos, para prever taxas de erosão por voçoroca em ambientes variados, porém, afirma não haver disponíveis modelos confiáveis, validados, quando se trata da previsão de impactos das mudanças ambientais em diferentes escalas espaciais, além dos efeitos na produção de sedimentos, nos processos hidrológicos e de evolução da paisagem. A razão provável a isto é o fato de que o voçorocamento envolve uma variedade de

subprocessos interativos, sendo um fenômeno de alta complexidade temporal e espacial, que exige uma gama de metodologias de medição, monitoramento e análise a se aplicar em pesquisas de longa duração (CASTILLO e GOMEZ, 2016; POESEN, 2018).

As tendências atuais das pesquisas de erosão por voçorocas indicam maior sofisticação nas análises de superfície, ao mesmo tempo que pode resultar em menor atenção à análise de processos básicos da dinâmica erosiva, o que reforça a necessidade do trabalho de campo clássico (CASTILLO e GOMEZ, 2016).

Compreende-se, assim, a importância dos experimentos na Geomorfologia, mais especificamente, nos estudos sobre erosão dos solos (LOUREIRO, 2013). Tais experimentos podem ser feitos em campo ou laboratório (PENTEADO, 1978), de acordo com temas e escalas diversas. Importante lembrar que o campo, apesar de ser um laboratório natural, de realidade comportamental não apreendida com a mesma exatidão ou semelhança em laboratórios e gabinetes (MARQUES, 1996), deixa o pesquisador sujeito às dinâmicas dos fenômenos estudados, o que comumente faz com que os planos traçados previamente, em gabinete, não sejam executados conforme desejado ou esperado (VENTURI, 2009).

### **2.1.2. O processo erosivo hídrico**

A erosão hídrica é o principal tipo de erosão no mundo, em especial em áreas tropicais, de elevados índices pluviométricos (Guerra, 2005a). O processo se inicia pela ação do salpico (*splash*) da gota de chuva sobre o solo, destacando as partículas e possibilitando seu transporte nos fluxos do escoamento superficial, primeiro difuso e em seguida concentrado por pequenos canais que se formam, as chamadas microravinas (SELBY, 1991; MORGAN, 2005; GUERRA, 2005a e 2007; MENDES, 2007; LIMA, L. 2008; LOUREIRO, 2010 e 2013; RANGEL, 2014; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; NEVES, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2015; GUERRA, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Se há menor teor de matéria orgânica, os agregados no topo do solo se rompem mais facilmente, levando a processos consequentes. Perdem-se argila, húmus e nutrientes, importantes na fertilidade do solo e estabilidade dos agregados (LOUREIRO, 2013; RANGEL, 2014; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; NEVES, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2015;

GUERRA, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Outras consequências são a redução da infiltração da água, favorecendo os fluxos superficiais, gerando mais perda de material (KIRKBY e MORGAN, 1980; COOKE e DOORNKAMP, 1990; GUERRA, 2005a, 2007 e 2016; LOUREIRO, 2013; RANGEL, 2014; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; NEVES, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2015; ZEGEYE *et al.*, 2016).

As taxas de infiltração dependerão, ainda, das propriedades do solo, da cobertura vegetal, do uso e manejo do solo, das características das encostas, características das chuvas (destacando-se a intensidade), umidade antecedente do solo, estruturas e agentes biológicos no solo (COOKE e DOORNKAMP, 1990; SELBY, 1991; GUERRA, 2005a e 2016; LOUREIRO, 2013; RANGEL, 2014; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; NEVES, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2015; ZEGEYE *et al.*, 2016).

O escoamento superficial (*runoff*) não ocorre, geralmente, de imediato à chuva (HORTON, 1945 *in* COOKE e DOORNKAMP, 1990; LOUREIRO, 2013; RANGEL, 2014; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; NEVES, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2015; GUERRA, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Estudos comprovam (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; COOKE e DOORNKAMP, 1990; SELBY, 1991; MORGAN, 2005; COELHO NETTO, 2007; LIMA, L. 2008; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016) que as taxas de infiltração tendem a ser maiores no início da precipitação, reduzindo e estabilizando durante o evento de chuva. A água, ao se infiltrar, vai preenchendo os poros, reduzindo a capacidade de infiltração, até sua saturação (LOUREIRO, 2013; RANGEL, 2014; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; NEVES, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2015; GUERRA, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Deve-se considerar, também, a umidade antecedente do solo, que pode acelerar esse processo (GUERRA, 2005a e 2016; LOUREIRO, 2013; RANGEL, 2014; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; NEVES, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2015; ZEGEYE *et al.*, 2016).

O solo saturado, conseqüentemente sem infiltração, sofre acumulação de água no topo, formando poças (*pounds*), antecedendo o escoamento superficial (CHORLEY *et al.*, 1984; COOKE e DOORNKAMP, 1990; SELBY, 1991; GUERRA, 2005a e 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Iniciado o escoamento superficial, identifica-se a mudança de atuação da erosão, que

passa a ter maior transporte de sedimentos e menor destacamento de partículas (GUERRA, 2005a e 2007 e 2016; LOUREIRO, 2013; RANGEL, 2014; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; NEVES, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2015; ZEGEYE *et al.*, 2016).

As gotas de chuva que caem sobre o fluxo são capazes de aumentar sua energia (GUERRA, 2007 e 2016; LOUREIRO, 2013; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; ZEGEYE *et al.*, 2016). O escoamento difuso origina a erosão em lençol ou erosão laminar, se as chuvas forem mais prolongadas. Seu fluxo, ainda não concentrado, é capaz de contribuir significativamente com a produção dos sedimentos (LIMA, 2008; LOUREIRO, 2013; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). A erosão em lençol é um processo erosivo menos perceptível na paisagem, comparada àquelas que geram feições de maior evidência, as ravinas e as voçorocas. Apesar disso, esse tipo de erosão não se torna, por isso, menos perigoso (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; LIMA L., 2008; LOUREIRO, 2013; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016).

Os principais fatores durante a erosão laminar são a turbulência do fluxo e a velocidade do escoamento encosta abaixo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; GUERRA, 2007 e 2016; LOUREIRO, 2013; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; ZEGEYE *et al.*, 2016). No transporte, partículas não coesas são carregadas pelo escoamento em lençol (*sheetwash*), e a descarga de sedimentos depende da rugosidade do terreno, das partículas e da inclinação da encosta (SELBY, 1991; LOUREIRO, 2013; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016).

No estágio em que o fluxo linear é estabelecido, concentrado em pequenos canais de profundidade em ampliação, são geradas as microrravinas, pela concentração de água escoando em pequenos e bem definidos canais. A crescente turbulência do fluxo aumenta a irregularidade no fundo das microrravinas, possibilitando surgirem cabeceiras (*headcuts*) (GUERRA, 2005a e 2016; LOUREIRO, 2013; SILVA, 2014; DOS SANTOS PEREIRA, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; CHEN *et al.*, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Durante esses processos, o fluxo concentrado ou canalizado, escoando na encosta, vai dando origem às ravinas, feições não conectadas à drenagem fluvial (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; SELBY, 1991; MORGAN,

2005; GUERRA, 2007 e 2016; LOUREIRO, 2013; KHALIQ e ABBASI, 2015; CHEN *et al.*, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). O desmatamento e o uso agrícola podem condicionar a aceleração de tais processos, ocasionando grande volume de erosão nas encostas (GUERRA, 2007 e 2016; LOUREIRO, 2013; KHALIQ e ABBASI, 2015; CHEN *et al.*, 2016).

As voçorocas podem ser feições de grande extensão e profundidade, de paredes íngremes e piso liso, sendo de certa maneira permanentes nas encostas (SELBY, 1991; GUERRA, 2007 e 2016; LOUREIRO, 2013; KHALIQ e ABBASI, 2015; WANG *et al.*, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Também definidas como uma “forma espetacular de erosão”, o que demonstra sua notoriedade na paisagem (Bertoni e Lombardi Neto, 1985; Andrade *et al.*, 2005; LOUREIRO, 2013; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016; WANG *et al.*, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Podem surgir a partir de ravinas, à medida que estas são aprofundadas e alargadas pela ação erosiva da água. Há colapsos de massas de solo nas laterais das voçorocas e à sua montante, e os sedimentos gerados são depositados nas partes baixas, ou carregados para os canais fluviais. São feições que podem se desenvolver, também, através de fluxos sub-superficiais, devido aos dutos (*pipes*), podendo ocasionar o desmoronamento da superfície, abrindo voçorocas (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; SELBY, 1991; GUERRA, 2007 e 2016; LOUREIRO, 2013; KHALIQ e ABBASI, 2015; WANG *et al.*, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016).

Internacionalmente as voçorocas são conceituadas como possuindo mais de 0,5 m de largura e profundidade, chegando a possuir 30 metros ou mais de comprimento (MORGAN, 2005; OLIVEIRA, 2005; GUERRA, 2007 e 2016; LOUREIRO, 2013; FULLEN, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; WANG *et al.*, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Tais valores não são fixos, e existem diversas classificações segundo o tamanho dessas feições, além da sugestão de estabelecer valores que sejam relativos a cada região (GUERRA, 2007). De acordo com Morgan (2005), as voçorocas costumam ser associadas à erosão acelerada e às instabilidades na paisagem. Esta concepção pertinente não considera o fato de que as voçorocas, assim como as ravinas, podem ser feições erosivas resultantes de desequilíbrios naturais, e não apenas desequilíbrios induzidos pela ação humana (OLIVEIRA, 2005; LOUREIRO, 2013; FULLEN, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016; WANG *et al.*, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016).

É um tipo de erosão originado por mecanismos atuantes em diferentes escalas temporais e espaciais, de caminhos preferenciais tomados pelos fluxos de escoamento

superficial e/ou subsuperficial, além de poderem atingir o lençol freático, tornando-se conectada a ele (Coelho Netto, 1998 *in* OLIVEIRA, 2005; LOUREIRO, 2013; SILVA, 2014; FULLEN, 2015; KHALIQ e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016; WANG *et al.*, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016). Para Araújo *et al.* (2013), as voçorocas são mais comuns em áreas de pastagem, provavelmente a principal forma de erosão presente em bacias hidrográficas. Feições de difícil controle e retenção exigem estabilização de sua base e de suas cabeceiras. Vale ressaltar que as voçorocas podem passar por ciclos de erosão e deposição, não sendo incomum a extrema atividade da cabeceira enquanto a seção à jusante da voçoroca esteja estabilizada, ou o inverso (Morgan, 2005; Loureiro, 2013; Fullen, 2015; Khaliq e ABBASI, 2015; GUERRA, 2016; WANG *et al.*, 2016; ZEGEYE *et al.*, 2016).

### **2.1.3. Fatores controladores da erosão**

Para estudar a degradação ambiental, recomenda-se a análise dos fatores condicionantes da erosão. Estes, através de sua interação, respondem pela determinação das taxas erosivas e suas variações, devendo ser estudados em detalhe, para que se tenha a compreensão de como, onde e por que a erosão ocorre (MORGAN, 2005; GUERRA, 2007; LOUREIRO, 2013; WANG *et al.*, 2019).

Os fatores controladores utilizados com maior frequência nos estudos sobre erosão dos solos são: propriedades físicas e químicas dos solos, erosividade da chuva, características das encostas e cobertura vegetal ou uso e cobertura da terra (POESEN *et al.*, 2003; SILVA *et al.*, 2003; MORGAN, 2005; VALENTIN *et al.*, 2005; GUERRA, 2007; LIMA *et al.*, 2008; PRUSKI, 2009; LOUREIRO, 2010; DENG *et al.*, 2019; GUSAROV *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019).

#### **2.1.3.1. Erodibilidade dos solos – propriedades físicas e químicas**

A erodibilidade é definida como a resistência do solo em ser removido e transportado (MORGAN, 2005; IBGE, 2009; WANG *et al.*, 2019). É uma condição proporcionada em função de complexas interações entre diversas propriedades físicas e químicas do solo (WISCHMEIER e MANNERING, 1969; GUERRA, 2007; WANG, B. *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019) e que não se mantém estática ao longo do tempo, possuindo uma dinâmica resultante

de modificações geradas por diferentes usos e manejos do solo, bem como das interações com forças exógenas atuantes (GUERRA, 2007; IBGE, 2009; WANG *et al.*, 2013; NEVES, 2015; TORRESANI *et al.*, 2019). Em resumo, a erodibilidade dos solos é um reflexo da suscetibilidade inerente que estes apresentam aos processos erosivos e, portanto, dependente de variadas propriedades dos solos (PRUSKI, 2009; POESEN, 2018; WANG *et al.*, 2019).

Estas propriedades estão entre os principais fatores controladores da erosão, tendo influência no movimento de água no solo (velocidade de infiltração, permeabilidade e geração de escoamento, por exemplo), na distribuição de forças erosivas, na resistência das partículas ao arraste e na forma como os solos responderão aos efeitos da chuva (LIMA *et al.*, 2008; COLOMBANI *et al.*, 2014 *apud* NEVES, 2015; PEREIRA, 2015; LI *et al.*, 2019; MUSHI *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019). São normalmente destacadas: as propriedades físicas (a) textura, (b) densidade (aparente) do solo, (c) estabilidade de agregados, (d) porosidade e (e) resistência à penetração; e as propriedades químicas (f) matéria orgânica e (g) pH (MORGAN, 2005; GUERRA, 2007; LIMA *et al.*, 2008; LOUREIRO, 2013; NEVES, 2015; PEREIRA, 2015; SILVA e GUERRA, 2015; RODRIGUES, 2016; RANGEL e GUERRA, 2017 e 2018a,b; LOUREIRO *et al.*, 2018; OUYANG *et al.*, 2018). Há, ainda, menção ao que seria as “propriedades hidráulicas do solo”, como retenção de água, taxa de infiltração e condutividade hidráulica (GILL, 2012 *apud* GOZUBUYUK *et al.*, 2014; MUSHI *et al.*, 2019).

A textura pode ser verificada de modo tátil em campo e determinada em laboratório, por meio da análise granulométrica de amostras de solo. Nas publicações em inglês utiliza-se o termo *particle size distribution*, algo como “distribuição do tamanho de partículas”, ou seja, granulometria. As diferentes proporções das frações granulométricas (Tabela 1) componentes do solo (areia, silte e argila) classificam os solos em diferentes classes texturais, representadas no triângulo textural (Figura 1).

Sua importância está na maior ou menor facilidade de remoção de cada fração. Silte e areia fina são consideradas as frações mais facilmente removidas pela erosão (POESEN *et al.*, 2003; FULLEN e CATT, 2004; MORGAN, 2005; GUERRA, 2005b e 2007; LIMA *et al.*, 2008; PRUSKI, 2009; LOUREIRO, 2013; NEVES, 2015; RODRIGUES, 2016; LOUREIRO *et al.*, 2018). Ou seja, solos com altos teores de uma ou das duas frações terão alto grau de erodibilidade. Por

outro lado, quanto mais argila houver, menos propenso à erosão será o solo, devido às características cimentantes desta fração, ainda que seja a menor em tamanho (WISCHMEIER e MANNERING, 1969; NEVES, 2015; SILVA e GUERRA, 2015). Os clássicos autores WISCHMEIER e MANNERING (1969) afirmam, ainda, que “a magnitude do teor de argila (...) declina com o maior teor de matéria orgânica, maior índice de agregação ou maiores teores de areia e silte”. A areia grossa, sendo um material mais grosseiro, poderia ter seu transporte pela água dificultado, porém, não possui cimentação que dificulte essa remoção, assim, é uma fração com elevados índices de erodibilidade (POESEN, 1981 *apud* GUERRA, 2007; PRUSKI, 2009; NEVES, 2015; PEREIRA, 2015; RANGEL e GUERRA, 2018a). Além disso, a textura é uma propriedade com maior dificuldade de modificação ao longo do tempo (KIEHL, 1979; GERRARD, 1992; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010; RODRIGUES, 2016).

Tabela 1 – Frações granulométricas de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) na escala de Atterberg. Fonte: DONAGEMA *et al.* (2011).

Tamanho das Frações Granulométricas da TFSA	
Areia grossa	2,0 mm a 0,2 mm
Areia fina	0,2 mm a 0,05 mm
Silte	0,05 mm a 0,002 mm
Argila	menor que 0,002 mm

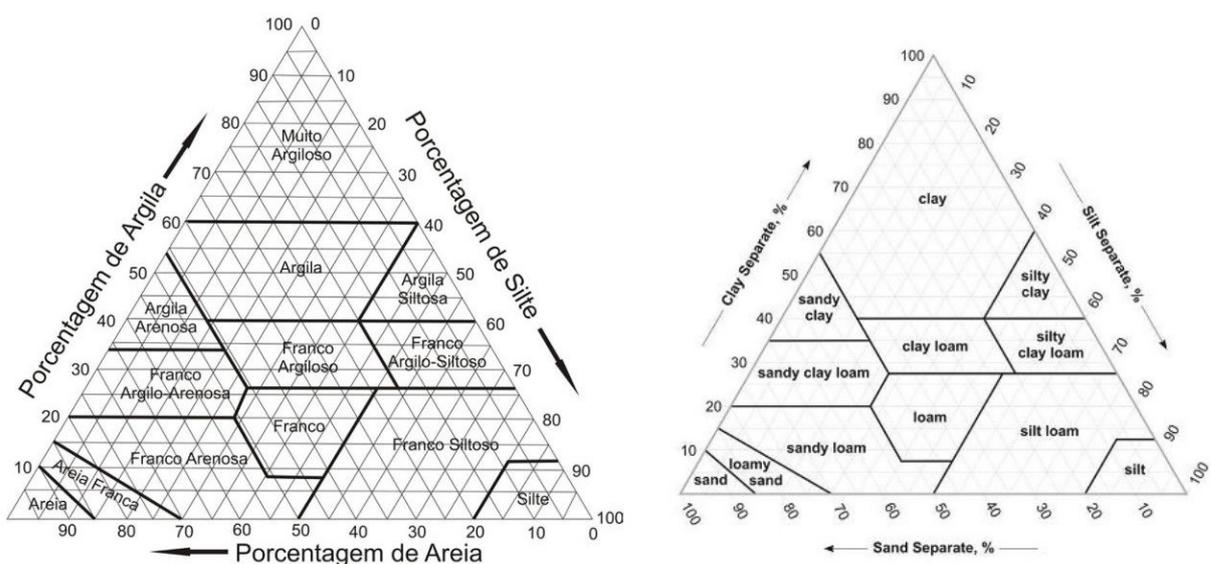


Figura 1 – Triângulos texturais, em porcentagem. À esquerda, adaptação de Lemos e Santos (1996) do triângulo do Departamento de Agricultura dos EUA (USDA, 1993), à direita. Fonte: NEVES, 2015.

Por um lado, solos arenosos são, normalmente, mais porosos, facilitando a infiltração de água e dificultando a geração de escoamento superficial, o que leva a menor erodibilidade. Por outro, estes solos, geralmente, apresentam baixos teores de argila, facilitando a remoção (*detachment*) dos sedimentos. Já os solos argilosos têm menos poros, reduzindo a capacidade de infiltração da água, porém, tornando-os mais resistentes ao escoamento (*runoff*), dada à coesão de suas partículas (FARMER, 1973 *in* GUERRA, 2007; SALOMÃO, 2005; LOUREIRO, 2013; NEVES, 2015; RODRIGUES, 2016).

Assim, as classes texturais médias, em especial as franco-arenosa e arenosa – além, obviamente, das classes com maiores teores de silte – são consideradas entre as mais propensas à erosão (FULLEN e CATT, 2004; LIMA, 2008; SMETS *et al.*, 2011; LOUREIRO, 2013; GUERRA *et al.*, 2014; POESEN, 2018). Sua erodibilidade será maior ou menor, de acordo com a interação com os outros fatores controladores dos processos erosivos, a exemplo do teor de matéria orgânica e a estabilidade de agregados (GUERRA, 2007; LOUREIRO, 2013; PEREIRA, 2015; POESEN, 2018).

O teor de matéria orgânica do solo é uma de suas propriedades mais importantes, afetando a erosão e conservação dos solos de variadas maneiras, interativamente com outros fatores – como textura, agregação e infiltração – e, por isso, não explica sozinha a erodibilidade dos solos (WISCHMEIER e MANNERING, 1969; MORGAN, 2005; GUERRA, 2007; LIMA *et al.*, 2008; BONILLA e JOHNSON, 2012; LOUREIRO, 2013; NACINOVIC *et al.*, 2014; SILVA e GUERRA, 2015; RODRIGUES, 2016). Em termos quantitativos, para análise da erodibilidade, solos com menos de 2% de carbono orgânico, que equivale a 3,5% de matéria orgânica, são mais propensos à erosão (GREENLAND *et al.*, 1975 *apud* GUERRA, 2007; FULLEN e CATT, 2004; MORGAN, 2005; LIMA *et al.*, 2008; LOUREIRO, 2013; SANTOS *et al.*, 2016; LOUREIRO *et al.*, 2018; RANGEL e GUERRA, 2018a).

Além de prover nutrientes, a matéria orgânica tem influência fundamental na estrutura do solo e na estabilidade de agregados (GUERRA, 1994 *in* OUYANG *et al.*, 2018; ELMHOLT *et al.*, 2008 *in* RANGEL e GUERRA, 2018a). Sendo assim, Guerra (2007) afirma que diversos estudos demonstram a matéria orgânica como o melhor agente agregador, conferindo maior estabilidade de agregados do que a argila. Desse modo, e em grandes quantidades, atua como agente cimentante na formação dos agregados do solo (NACINOVIC

*et al.*, 2014; NEVES, 2015). Estes se tornam, então, mais resistentes à ação da água das chuvas, reduzindo efeitos do salpicamento e a formação do escoamento superficial, dada a melhoria da porosidade e da capacidade de infiltração e circulação de água no solo, proporcionadas pela presença e aumento da matéria orgânica (MORGAN, 2005; GUERRA, 2007; LIMA *et al.*, 2008; PODWOJEWSKI *et al.*, 2011; LOUREIRO, 2013; NEVES, 2015).

A Importância da matéria orgânica se torna maior em solos com altos teores de silte (FULLEN e CATT, 2004; GUERRA, 2005b e 2007; LOUREIRO, 2013; NEVES, 2015). Ou seja, se o silte em grandes quantidades eleva a erodibilidade dos solos, quanto maior o teor de matéria orgânica, menor será a erodibilidade. Apesar de a matéria orgânica ser relevante no aumento de coesão entre as partículas de argila (WUDDIVIRA *et al.*, 2013 *in* NACINOVIC *et al.*, 2014), se o teor de argila for extremamente elevado, pequenas mudanças nos teores de matéria orgânica, areia e silte perdem significado prático (WISCHMEIER e MANNING, 1969). Estes clássicos autores (*op cit.*) afirmam, também, que “a energia necessária à chuva para iniciar o escoamento e as taxas finais de infiltração aumentam diretamente com o aumento de matéria orgânica”.

A manutenção da matéria orgânica na camada superficial do solo, como a serrapilheira, é fonte de proteção contra o início do processo erosivo e está mais presente em sistemas de uso da terra que realizam práticas conservacionistas, retroalimentando o solo de material orgânico (GUERRA, 2005; BOT e BENITES, 2005 *in* GOZUBUYUK *et al.*, 2014; REICHERT *et al.*, 2011; NEVES, 2015). Já as práticas convencionais de uso agrícola aceleram a decomposição da matéria orgânica, pois a oxidação da matéria orgânica leva a perdas de carbono orgânico, a partir da ruptura dos agregados (OADES, 1984; BOT e BENITES, 2005 *in* GOZUBUYUK *et al.*, 2014). Vale destacar que a matéria orgânica é considerada, de acordo com Mosaddeghi (2009 *apud* RODRIGUES, 2016), a principal fonte de carbono aos microrganismos decompositores do solo.

A estabilidade dos agregados é essencial para avaliar a vulnerabilidade à degradação dos solos (JAKŠIK *et al.*, 2015 *in* NEVES, 2015), ou seja, é extremamente relevante para analisar a suscetibilidade dos solos tropicais à erosão hídrica, segundo diversos autores citados por Madari (2004), já que o grau de erodibilidade dos solos se relaciona diretamente com o quão estáveis são os agregados quando em contato com a água. O agregado do solo

pode ser definido como um conjunto de partículas minerais (areia, silte e argila) do solo aderidas umas às outras, de modo mais forte que outras partículas próximas, através de substâncias orgânicas e inorgânicas (MADARI, 2004; BRONICK e LAL, 2005; MUSHI *et al.*, 2019). São classificados, de acordo com o seu tamanho, em macroagregados (maiores que 250  $\mu\text{m}$ ) e microagregados (menores que 250  $\mu\text{m}$ ) (TISDALL e OADES, 1982; MADARI, 2004; BRONICK e LAL, 2005; RANGEL e GUERRA, 2017).

A estabilidade de agregados tem influência direta dos teores de argila e matéria orgânica, com papel fundamental desta última, já que quanto menor for a sua quantidade, menos resistência à erosividade das chuvas proporcionará aos agregados (GUERRA, 2007; NEVES, 2015; RODRIGUES, 2016). Portanto, é uma das propriedades mais sensíveis às práticas antrópicas de uso e manejo (WENDLING *et al.*, 2005). Em se tratando de manejo, aquele que vise aumento de agregação do solo deve fazer aumentar a produção primária dos vegetais, que elevará o aporte de carbono no solo, diminuindo distúrbios e taxas de perda deste elemento através de decomposição e da erosão (BRONICK e LAL, 2005). Quanto mais estáveis forem os agregados, melhores serão os índices de porosidade e a aeração do solo, favorecendo o desenvolvimento de plantas e microrganismos, os processos de infiltração da água e reduzindo a rápida formação do escoamento superficial, consequentemente aumentando a resistência do solo aos processos erosivos (GUERRA, 2007; MATOS *et al.*, 2008 *in* RANGEL e GUERRA, 2017; WENDLING *et al.*, 2012).

A densidade (aparente) do solo e a resistência à penetração são propriedades indicativas do maior ou menor grau de compactação do solo, sendo facilmente alteradas, negativa ou positivamente, em função do uso e cobertura da terra (GUERRA, 2007; LIMA *et al.*, 2008; KELLER e HAKANSSON, 2010; HUBER e SOUZA, 2013; LOUREIRO, 2013; RANGEL e GUERRA, 2017, 2018a,b; LOUREIRO *et al.*, 2018). Alterações negativas na densidade do solo se dão, por exemplo, pelo uso agrícola do solo, principalmente quando se utiliza maquinário pesado, o pisoteio de animais em pastagens, ou mesmo o constante tráfego de pessoas em trilhas ecoturísticas (GUERRA, 2007; GOZUBUYUK *et al.*, 2014; GUERRA *et al.*, 2014; RODRIGUES, 2016; RANGEL e GUERRA, 2018a), enquanto alterações positivas podem ser realizadas através de práticas conservacionistas (LIMA *et al.*, 2008; GU *et al.*, 2019; XIONG *et al.*, 2019).

Solos em áreas de floresta, geralmente, apresentam baixa densidade aparente, variando entre 0,6 a 0,8 g/cm<sup>3</sup>, principalmente devido a maiores aportes de matéria orgânica e quantidade de raízes, enquanto que valores entre 1,1 e 1,6 g/cm<sup>3</sup> seriam características de solos com manejo inadequado (KIEHL, 1979; YÜKSEK *et al.*, 2010 *in* NEVES, 2015; RANGEL e GUERRA, 2018a). Nesse sentido, Morgan (2005) estipula o valor de 1,50 g/cm<sup>3</sup> como limite entre baixa densidade e alta densidade do solo. Santos *et al.* (2016) concordam com este valor para alta compactação, mas colocam que valores abaixo de 1,0 g/cm<sup>3</sup> de densidade do solo representariam baixa compactação. Já Rangel e Guerra (2018a), analisando trilhas ecoturísticas, chamaram de “densidade crítica do solo” valores de 1,4 a 1,5 g/cm<sup>3</sup> de densidade aparente, observando uma relação de dependência com a classe textural do solo.

A porosidade tem papel fundamental na entrada de água no solo (KIEHL, 1979; LIMA *et al.*, 2008), pois quando a porosidade diminui, menor será a taxa de infiltração e mais suscetível ao escoamento superficial será o solo (GUERRA, 2007; THOMAZ e VESTENA, 2012). Destaca-se que a porosidade total e a densidade (aparente) do solo são inversamente proporcionais, ou seja, quanto mais denso – quer dizer, mais compactado – for o solo, menor será a sua porosidade, pois os espaços preenchidos por ar e água serão reduzidos (SALGADO, 1995 *in* PEREIRA, 2015; GUERRA, 2007; KELLER e HAKANSSON, 2010; GOZUBUYUK *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2016; LOUREIRO *et al.*, 2018).

Segundo Grohmamm (1975 *in* SILVA e GUERRA, 2015), considerando condições naturais, a porosidade varia entre 40 e 60%, podendo chegar a valores extremos de até 30 e 80%. Já Kiehl (1979), considera valores de 35 a 50% de porosidade em solos arenosos e de 40 a 60% em solos argilosos. Lima (2008) também definiu valores, com intuito de estipular classes de suscetibilidade à erosão na bacia hidrográfica do rio Macaé: solos com baixa porosidade, 35 a 40%, teriam alta suscetibilidade; com média porosidade, 40 a 55%, média suscetibilidade; e com alta porosidade, acima de 55%, seriam de baixa suscetibilidade.

Todas essas propriedades físicas e químicas do solo, entre outras, tem sua importância nos estudos sobre erosão e quanto maior for a integração de análise, conjuntamente a outros fatores controladores do processo erosivo, como será visto adiante, melhor serão os resultados apresentados e a compreensão dos fenômenos erosivos.

### 2.1.3.2. Erosividade

A erosividade da chuva é a capacidade da chuva em causar erosão nos solos, relacionada à sua distribuição no tempo e no espaço (GUERRA, 2005b; ASSOULINE e BEM-HUR, 2006; PRUSKI, 2009; NEVES, 2015). Hoyos *et al.* (2005) resumem a erosividade como a influência do clima na erosão, geralmente expressa em termos de quantidade e intensidade de chuva, ambas determinando o potencial em causar erosão. Guerra (2007) elenca os parâmetros que determinam a erosividade de um evento chuvoso: (a) total de chuva precipitada; (b) intensidade da chuva; (c) momento da chuva (produto entre massa e velocidade da gota); e (d) energia cinética das gotas de chuva. Ainda, Morgan (2005) afirma que a intensidade das chuvas é frequentemente reconhecida como a mais importante característica na avaliação da erosão.

A intensidade terá importância para as taxas de infiltração de água no solo, dependente, ainda, das propriedades do solo, características das encostas, cobertura vegetal e, também, do tipo de chuva. Isto refletirá no escoamento superficial (*runoff*), gerado quando a capacidade de infiltração é excedida (GUERRA, 2007; PRUSKI, 2009).

A erosividade também está relacionada diretamente à capacidade de infiltração do solo. Coelho Netto (2007) explica que a intensidade de chuva menor que a capacidade de infiltração leva a igualdade da taxa de infiltração com a pluviosidade; enquanto que a intensidade de chuva sendo maior do que a capacidade de infiltração, parte da água precipitada será absorvida pelo solo e o restante, após a saturação, será escoado através da superfície.

A energia cinética da chuva está diretamente relacionada com a sua intensidade, em função da duração, massa e tamanho de gotas, e à velocidade final destas (HOYOS *et al.*, 2005; GUERRA, 2007; PRUSKI, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2012; HAO *et al.*, 2019). Para gerar uma relação entre energia cinética e intensidade de chuva para o Brasil, Wagner e Massambini (1988 *in* OLIVEIRA *et al.*, 2012) analisaram a distribuição do tamanho da gota em 533 amostras e concluíram que sua equação não teve diferença significativa em comparação à equação de Wischmeier e Smith (1978 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2012), que permanece amplamente utilizada no país.

O momento de uma chuva é o produto entre massa e velocidade da gota, sendo empiricamente associado à remoção de partículas do solo. Ao atingir o solo, o impacto das gotas de chuva rompe os agregados e leva à erosão por salpicamento (GUERRA, 2005b; MORGAN, 2005; MENDES, 2007; PRUSKI, 2009; MA *et al.*, 2014; HAO *et al.*, 2019).

O total de chuva em si tem baixa influência na perda de solo, segundo Hudson (1961 *in* GUERRA, 2007; PRUSKI, 2009), mesmo que haja tendência de aumento das taxas, conforme os totais de chuva sejam maiores. Assim, ainda que o total pluviométrico seja muito utilizado em diversos estudos de erosão dos solos, ele não é suficiente para quantificar o potencial erosivo da chuva, inclusive no Brasil (GUERRA, 2007; PRUSKI, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Quanto ao grau de erosividade, Hudson (1971 *in* HOYOS *et al.*, 2005) propôs um limite de intensidade entre chuvas erosivas e não erosivas, de  $25 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , chegando a indicar que apenas 5% das chuvas em áreas temperadas excederiam esse valor, enquanto que em áreas tropicais tal valor seria excedido por 40% dos eventos de chuva. A diferença entre regiões tropicais e temperadas refere-se a diferenças de quantidade de precipitação (frequência), intensidade e energia cinética da chuva (HOYOS *et al.*, 2005). Estes autores chamam a atenção para a importância de considerar valores sazonais de erosividade, que vão além dos registros locais de intensidade de chuva, em regiões tropicais úmidas, onde a sazonalidade da chuva estaria associada à “complexa topografia”. Destacam, inclusive, que entre os 20 valores mais altos de intensidade da chuva observados em seus estudos, 71% deles ocorreram em períodos chuvosos.

Nesse sentido, Kašanin-Grubin *et al.* (2018) afirmam que as regiões úmidas são afetadas pela intensidade de precipitação durante estações chuvosas, o que leva a taxas muito altas de erosão. Oliveira *et al.* (2012) reforçam a ideia de sazonalidade, ao afirmarem que no Brasil a ocorrência de chuvas intensas em certas épocas do ano – no caso, nas estações chuvosas – são responsáveis pelos maiores valores de erosividade. Ainda assim, de acordo com pesquisadores citados por estes autores, não significa, necessariamente, que altos valores de precipitação anual produzam valores mais altos de erosividade. Contudo, Nearing *et al.* (2004 *in* POESEN, 2018) mostram que quando a quantidade de chuva

aumenta, a erosão e o escoamento aumentam a uma taxa ainda maior, chegando à ordem de 1,7 a proporção entre o aumento da erosão e o aumento anual das chuvas.

Regiões tropicais íngremes são caracterizadas por alta erosão e chuvas fortes e as relações entre precipitação total e erosividade parecem associadas ao gradiente de elevação e à variabilidade local da quantidade e intensidade de precipitação (SIDLE *et al.*, 2017). Poesen (2018) conclui que a erosividade de chuvas de baixa intensidade, em ambientes montanhosos tropicais, pode ser consideravelmente subestimada, ao prever a erosividade através do uso de relações estabelecidas em outros lugares. Panagos *et al.* (2017) previram para a Europa, em relação ao ano de 2010, um aumento relativo da erosividade da chuva até o ano de 2050 de 18%, com grande variabilidade espacial. Portanto, uma vez que em áreas tropicais há eventos de chuva mais frequentes e intensos, haveria um aumento de erosividade das chuvas ainda maior a ser considerado, o que traria muitos problemas de erosão, movimentos de massa e enchentes.

Oliveira *et al.* (2012) analisaram diversos estudos de erosividade no Brasil e trouxeram dados interessantes para caracterização deste fator controlador da erosão. Para interpretar o índice de erosividade do Brasil, os autores verificaram que o valor de  $7.357 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , representativo de forte erosividade, foi excedido em 52,6% dos dados brasileiros levantados. A partir destes resultados, apontam que há várias áreas de risco de erosão hídrica no Brasil, sobretudo nas regiões Sudeste (incluindo, entre outros, o Rio de Janeiro) e Centro-Oeste. Além disso, os maiores valores de erosividade foram encontrados em estudos na região norte, de clima equatorial, portanto, mais chuvoso (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Seus estudos encontraram, ainda, valores de erosividade da chuva variando entre 1.672 a  $22.452 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , com média (e desvio padrão) de  $8.403 \pm 4.090 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ . De acordo com os autores, esta variação da erosividade da chuva no país é similar ao que se observa em outras regiões tropicais e são, conforme esperado, maiores que os valores de regiões de clima temperado.

Por fim, cabe destacar alguns pontos relevantes quanto à análise da erosividade da chuva: (1) embora dados pluviométricos diários possam ser utilizados em equações e métodos estimativos da erosividade, por terem maior disponibilidade para muitos lugares, com boa cobertura espacial e temporal, (2) são necessários dados de alta precisão

(pluviográficos) para uma avaliação rigorosa da erosividade; (3) bem como é recomendável a utilização de uma ampla série temporal de dados de pluviosidade, de no mínimo 15 a 20 anos, o que, infelizmente, não é comum de se encontrar em muitas partes do mundo (HOYOS *et al.*, 2005; PRUSKI, 2009; BONILLA e VIDAL, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2012). Como indicam Bonilla e Vidal (2011), ao estudarem a erosividade no Chile, a falta de uma caracterização sistemática do território em termos de erosividade da chuva traz limitações a programas de conservação do solo e da água. Pode-se incluir nesta deficiência os programas de recuperação e reabilitação de áreas degradadas.

### **2.1.3.3. Características das encostas**

Há uma diversidade de características das encostas com diferentes relevâncias para os estudos sobre os processos erosivos, condicionando a dinâmica da água. É importante destacar que nas encostas mais íngremes não necessariamente ocorrerão os processos geomorfológicos mais intensos, e que é necessário avaliar as características das encostas em conjunto com outros parâmetros, já que encostas semelhantes podem ter respostas erosivas distintas. As principais são: a forma das encostas, que vai influir na distribuição dos fluxos, caminhos preferenciais e locais de acumulação; a declividade; e o comprimento de rampa, que influem na velocidade do escoamento (GUERRA, 2005b e 2007; MORGAN, 2005; ASSOULINE e BEN-HUR, 2006; MENDES, 2007; LIMA *et al.*, 2008; NEVES, 2015; PEREIRA, 2015; JIANG *et al.*, 2018; GUSAROV *et al.*, 2019; MUSHI *et al.*, 2019).

Portocarrero (2004) destaca que a geometria das encostas gera claros efeitos sobre a orientação dos fluxos de escoamento, com destaque para as formas côncavas do relevo, que exercem grande controle no escoamento superficial e no transporte dos sedimentos nas chamadas “cabeceiras de drenagem em anfiteatro”. A classificação das encostas de Hack e Goodlett (1960 *in* PORTOCARRERO, 2004) é amplamente utilizada, dividindo-as em fundos de vale (*hollows*), cristas (*noses*) e encostas laterais (*side slopes*). A forma das encostas definirá o direcionamento dos fluxos, sendo eles convergentes nas concavidades, divergentes nas convexidades, por exemplo (PORTOCARRERO, 2004; NEVES, 2015; JIANG *et al.*, 2018; GUSAROV *et al.*, 2019; MUSHI *et al.*, 2019).

Cooke e Doornkamp (1990) verificaram variação de perdas de solo baseadas no comprimento de rampa. Quanto maior for o comprimento, maior será o escoamento superficial (*runoff*) e a velocidade dos fluxos, aumentando a erosão (KRAMER e MEYER, 1969 *in* GUERRA, 2007). A tabela 2 a seguir, modificada de Bertoni e Lombardi Neto (2010) por Pereira (2015), mostra os efeitos do comprimento de rampa e porque é importante analisá-lo. Nota-se que quanto maior o comprimento de rampa, maior será a perda de solo, enquanto que haverá pouca perda de água. Já quanto menor o comprimento, maior perda de água ocorrerá.

Tabela 2 – Efeito do comprimento de rampa, com declividades entre 6,5 e 7,5%, para médias de chuva de 1.300 mm. Fonte: PEREIRA, 2015, modificado de Bertoni e Lombardi Neto (2010).

Comprimento da rampa (m)	Perdas de	
	Solo (t/ha)	Água (% da chuva)
25	13,9	13,6
50	19,9	10,7
100	32,5	2,6

Bertoni e Lombardi Neto (1985) consideram a declividade e o comprimento de rampa como tendo influência proporcional quanto ao volume da água que escoar na encosta, afirmando que o segundo é menos importante que o primeiro. Para Guerra (2007), a declividade ganha significância a partir do momento que o escoamento superficial se estabelece na encosta, ainda que não seja função direta da declividade. Importante frisar que as encostas mais íngremes podem apresentar menos erosão, devido a presença de solos mais rasos (MORGAN, 2005).

Jorge e Guerra (2013) e Pereira (2015) reforçam que declividades baixas, de 3° a 5° são suficientes para que haja erosão laminar, capaz de gerar altas taxas de perda de solo. Nesse sentido, analisando a suscetibilidade dos solos à erosão na bacia do rio Macaé (RJ), Lima (2008) classificou como tendo alta suscetibilidade erosiva encostas que tinham de 10° a 15° de declividade e encostas de mais que 35° de declividade, enquanto aquelas de 25° a 35° foram classificadas como sendo de muito alta suscetibilidade.

A topografia é considerada um fator erosivo, pois o gradiente da encosta controla de maneira direta a erosividade do escoamento superficial (KNAPEN e POESEN, 2010). Estes autores indicam, ainda, a possibilidade de a topografia, tal qual o uso da terra e as propriedades dos solos, controlar mais o início do voçorocamento do que o recuo de cabeceiras de voçorocas. Segundo Castillo e Gomez (2016), a declividade da encosta vem sendo considerada um fator crítico, que explica a variabilidade das taxas erosivas sob todas as condições ambientais. Estes autores ressaltam que há elevada variedade de taxas de erosão associadas a declividades suaves e íngremes, sendo a maior média de ocorrência em 0 a 20% (em torno de 11°). Porém, a maioria dos estudos envolvem encostas nesta faixa, ao utilizarem parcelas experimentais em áreas agrícolas (CASTILLO e GOMEZ, 2016).

A orientação das encostas é outra característica relevante. Kasanin-Grubin *et al.* (2018) explicam que há uma variabilidade de microclima (variação local restrita do padrão climático), em função da orientação das encostas, de maior notabilidade em áreas áridas. Ainda de acordo com estes autores, isto se dá porque encostas com diferentes orientações recebem variadas radiações e podem receber diferentes entradas (*inputs*) de precipitação. Contudo, Churchill (1981 *in* Kasanin-Grubin *et al.*, 2018) aponta que as diferenças quanto à orientação das encostas teriam maior influência em áreas áridas, devido às condições críticas de umidade, do que em áreas com umidade mais abundante. Em outras palavras, a orientação das encostas perderia relevância na análise do processo erosivo, devido a melhores condições de umidade bem distribuída nas encostas de modo geral.

Castillo e Gomez (2016) consideram que a avaliação de limiares topográficos referentes ao início de surgimento de voçorocas é uma abordagem extremamente popular na literatura sobre erosão, partindo do pioneirismo de Patton e Schumm (1975 *in* CASTILLO e GOMEZ, 2016), mencionando, ainda, que o tema “mereceu uma revisão completa” de Torri e Poesen (2014). Estes últimos levantaram diversos estudos que investigaram as condições topográficas críticas, sendo expressão da declividade local da encosta (referido como S) e da área de drenagem (referida como A), elementos controladores do desenvolvimento e da posição das cabeceiras de voçorocas em diversas paisagens. Estudos anteriores (KNAPEN e POESEN, 2010; GAO, 2013) já afirmavam que o surgimento de voçorocas não se dá em qualquer ponto nas encostas, sendo controlado por um limiar topográfico, resultado da relação entre uma declividade crítica (da superfície do solo),

normalmente na cabeceira do canal erosivo, necessária para iniciar a incisão em uma dada área de drenagem, ou área de contribuição do escoamento.

O limiar de área-declividade exposto por Torri e Poesen (2014), segundo Vanmaercke *et al.* (2016), justificaria o importante fato de que as cabeceiras das voçorocas se originam, geralmente, em encostas relativamente íngremes. Uma vez recuada, a cabeceira poderia migrar para encostas menos íngremes, como platôs, podendo resultar numa diminuição de energia dos fluxos e, conseqüentemente, as taxas de recuo da cabeceira se tornariam menores (VANMAERCKE *et al.*, 2016). As reais quantidades de água drenadas para a cabeceira dependerão, entre outros fatores, da forma e topografia das encostas da bacia de contribuição, da distribuição espacial do uso da terra adotado, das propriedades do solo e das características da precipitação (VANMAERCKE *et al.*, 2016).

Em outra perspectiva, os resultados de Li *et al.* (2015) indicaram que os fatores topográficos tiveram maior influência para o desenvolvimento de voçorocas em bacias com menor cobertura vegetal e que, conseqüentemente, o aumento de vegetação reduziu os efeitos da topografia. Inclusive, afirmam que ao superar 60% de cobertura vegetal nas áreas de drenagem à montante da cabeceira, o desenvolvimento da voçoroca foi significativamente controlado. Portanto, nota-se mais uma vez a importância da cobertura vegetal nos estudos de erosão dos solos.

#### **2.1.3.4. Cobertura vegetal**

A cobertura vegetal tem papel fundamental e diverso sobre a dinâmica da erosão dos solos. A cobertura vegetal defende naturalmente o terreno contra a erosão, porque protege o solo da ação de agentes geomorfológicos modeladores do relevo, cujos efeitos podem ser agravados pelo mau uso e manejo, sobretudo em áreas tropicais, com seus índices pluviométricos elevados e concentrados em certas épocas do ano (Salomão, 2005; WANG *et al.*, 2019). A vegetação, pela penetração das raízes, cria caminhos para a água no solo. Os restos vegetais depositados na superfície, formando a serrapilheira, combatem a erosão através do aporte de matéria orgânica gerado, conferindo maior resistência aos agregados e

beneficiando propriedades físicas e químicas frente aos processos erosivos (LIMA *et al.*, 2008; GU *et al.*, 2019; KOOCH *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019).

Portocarrero *et al.* (2006) colocam que entre os efeitos hidrológicos da vegetação, o mais importante é a redução dos processos erosivos sobre as encostas, dando-lhes estabilidade e evitando a formação das diferentes feições erosivas. Os autores elencam cinco importantes funções da cobertura vegetal: (1) na interceptação da água da chuva, visto que a parte aérea e a serrapilheira reduzem a energia cinética das gotas, prevenindo o efeito *splash*; (2) na retenção de partículas e sedimentos pelas raízes e serrapilheira, respectivamente; (3) no retardamento do escoamento, já que a serrapilheira melhora a rugosidade do terreno, reduzindo a velocidade dos fluxos; (4) na infiltração de água, pois raízes e serrapilheira melhoram a porosidade e permeabilidade do solo; e (5) na transpiração, considerando que a evapotranspiração retarda a saturação do solo e, portanto, a formação do escoamento superficial.

Sidle *et al.* (2017) afirmam que mudanças na cobertura vegetal, de floresta para plantio agrícola e, depois, para pastagem, tornam os solos vulneráveis à degradação. Desse modo, Ochoa *et al.* (2016) alertam que converter a cobertura vegetal natural em pastagens, ou culturas, leva a um rápido declínio da matéria orgânica do solo. Nesse sentido, a retirada da cobertura florestal, com a ocorrência de altas temperaturas e chuvas intensas, sobretudo em solos naturalmente pouco férteis, pode levar à rápida lixiviação dos nutrientes (ANDRADE *et al.*, 2003). Além disso, a geração de escoamento superficial é aumentada em condições de pouca cobertura vegetal, vegetação esparsa, gradientes elevados e presença de crostas (SIDLE *et al.*, 2017). Nesse sentido, estes autores evidenciam que tais padrões espaciais da vegetação e do uso da terra influenciam fortemente a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas.

A vegetação afeta a formação de agregados, devido à ação mecânica das raízes e à excreção de substâncias com ação cimentante, que fornecem, indiretamente, nutrientes à fauna do solo (KIEHL, 1979). O tipo de vegetação tem influência na estrutura do solo, assim, gramíneas teriam maior eficiência no aumento e manutenção da estabilidade de agregados do que leguminosas (Carpenedo e Mielniczuk, 1990 *in* WENDLING *et al.*, 2005), devido ao seu extenso e constantemente renovado sistema radicular (Harris *et al.*, 1966 *in* WENDLING

*et al.*, 2005). Esses autores ressaltam, porém, que leguminosas são importantes para rotações em pastagens perenes, porque fornecem nitrogênio, que favorece maior taxa de decomposição. Já Perin *et al.* (2002 *in* WENDLING *et al.*, 2005) verificaram que a cobertura viva de leguminosas herbáceas perenes conferem maiores índices de estabilidade de agregados nos primeiros 5 cm do solo.

As gramíneas são o tipo de vegetação que recobrem as pastagens e, contrariamente ao que se possa pensar, é um tipo de cobertura muito eficiente contra a erosão pelo escoamento superficial, porque seu sistema radicular auxilia a capacidade de infiltração do solo (BOTELHO e SILVA, 2007). É sabido que o pisoteio de animais reduz a cobertura vegetal e, conseqüentemente, o superpastoreio deixa o solo mais suscetível à erosão (POESEN, 2018). Conseqüentemente, podem ser formados os terracetes de pisoteio do gado, capazes de se tornarem caminhos preferenciais para o escoamento, sendo pontos de descontinuidade nas encostas.

Os solos nas florestas, normalmente, possuem capacidade de infiltração maior que solos descobertos, graças à serrapilheira e à atividade de organismos biogênicos (microrganismos, animais da fauna endopodônica e raízes), que favorecem a porosidade e permeabilidade, melhorando a estrutura do solo (ARAÚJO *et al.*, 2009; MENDES, 2007; BOTELHO e SILVA, 2007; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010; ZENG *et al.*, 2018).

A vegetação florestal intercepta a precipitação em seus diversos estratos, desde o arbóreo até a serrapilheira, reduzindo ou impedindo a desagregação de partículas do solo, ao impedir o impacto direto das gotas de chuva (ARAÚJO *et al.*, 2009; MENDES, 2007; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010; ZENG *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2019). As copas armazenam parte da água, que retorna à atmosfera pela evapotranspiração; o restante chega ao solo com energia reduzida, depois de atravessar as copas e através do fluxo de tronco, proporcionando menos erosão (SELBY, 1991; MORGAN, 2005; COELHO NETTO, 2007; MENDES, 2007; GUERRA, 2007; BOTELHO e SILVA, 2007; WANG *et al.*, 2019). Contudo, há tipos de cobertura vegetal que aumentam a energia cinética das gotas ao acumularem água em suas folhas, que ao escorrer delas amplia o efeito do salpicamento.

Poesen (2018) aponta sobre a maior e a menor atenção dispensada na literatura acerca dos efeitos da vegetação acima e abaixo do solo, respectivamente. Elencou estudos

que afirmam o papel das raízes, como sendo pequeno perante a erosão por *splash* e importante frente à incisão da erosão no solo; e a negligência, ou menor atenção, quanto aos efeitos das raízes sobre as taxas de erosão hídrica em modelos preditivos de erosão laminar e por ravinas, que consideram, em sua maioria, apenas as características das copas arbóreas, como cobertura, altura acima da superfície e arquitetura. Afirma, pois, que as raízes se tornam importantes nestes processos, quando a biomassa acima do solo desaparece, devido ao pastoreio, à seca ou ao fogo.

As raízes afetam a erodibilidade com a liberação de fluidos orgânicos, com estabilização de agregados e com aumento de resistência à tensão, devido ao aumento de coesão (POESEN, 2018). Este autor também menciona que diferentes tipos de raízes terão efeitos variados sobre as taxas de erosão, de acordo com as classes texturais dos solos, por exemplo, raízes fibrosas em solos arenosos seriam mais eficazes em reduzir taxas de erosão. Ainda, a contribuição de dois entre os principais efeitos das raízes sobre a erodibilidade – a ligação mecânica do solo e o fortalecimento das ligações entre suas partículas por meio dos fluidos liberados pelas raízes – é pouco conhecida (POESEN, 2018).

Entre os fatores relacionados à erosão por voçorocas, a vegetação pode desempenhar importantes papéis: proteger o solo do impacto das gotas de chuva; aumentar a resistência à erosão pelo fluxo concentrado; e reduzir a força do escoamento superficial durante evento chuvoso. Assim, mudanças de uso da terra que aumentem a cobertura vegetal, ajudarão a controlar o recuo da voçoroca e a produção de sedimentos (LI *et al.*, 2015). Logo, como afirmam Poesen *et al.* (2003) e Marden *et al.* (2012), vegetação e uso da terra em bacias hidrográficas são tidos como fatores-chave na avaliação do desenvolvimento de voçorocas.

Áreas florestais podem apresentar voçorocas, que tendem a ser relíquias de períodos passados de erosão encontrando-se estáveis, em função da proteção ofertada pela vegetação (RODZIK *et al.*, 2009 *in* CASTILLO e GOMEZ, 2016), ainda que perturbações externas possam reativá-las, como desmatamentos ou incêndios, por exemplo (CASTILLO e GOMEZ, 2016).

Zegeye *et al.* (2016), a partir de duas voçorocas em seu estudo, verificaram o que outros autores citados por eles observaram anteriormente: que a vegetação pode reduzir a

expansão dessas feições através: (1) do aumento da resistência ao cisalhamento proporcionado pelas raízes; (2) da redução do escoamento durante tempestades; e (3) da retenção de sedimentos. Portanto, como relatam Crouch e Blong (1989 *in* LI *et al.*, 2015), a vegetação pode ser usada como um sinal de estabilização de voçorocas.

De diversas maneiras as taxas de recuo de cabeceiras de voçorocas podem ser reduzidas pela presença de vegetação nessas áreas, sendo a principal delas o aumento da coesão do solo, além da redução da velocidade dos fluxos. Nesse sentido, os efeitos da cobertura vegetal dependerão, também e principalmente, da extensão e arquitetura de seus sistemas radiculares. Ainda assim, é difícil quantificar a eficácia da vegetação na redução das taxas de recuo de uma voçoroca, pois há dificuldade em medir características da biomassa abaixo do solo, a exemplo da densidade de raízes, e poucos dados disponíveis acerca dos efeitos dos sistemas radiculares sobre as taxas de erosão pelo fluxo concentrado (VANMAERCK *et al.*, 2016). Este autor conclui que, por essas razões, os modelos empíricos para as taxas de recuo de cabeceiras não tratam de modo explícito a vegetação em cabeceiras de voçorocas.

LI *et al.* (2015) corroboram esta conclusão, ao afirmarem que, apesar de haver estudos que tentaram prever o avanço de voçorocas, ou suas cabeceiras em variados ambientes, a vegetação não foi incluída em nenhum dos modelos relatados sobre recuo de cabeceiras de voçorocas. Ainda que sejam conhecidos os efeitos da vegetação no favorecimento à infiltração de água e em controlar o desenvolvimento de voçorocas (VALENTIN *et al.*, 2005).

Sabendo da importância da vegetação para o controle das forças exercidas pelo escoamento e a resistência do topo do solo à erosão, LI *et al.* (2015) sugerem que haver mais de 60% de cobertura vegetal nas áreas de drenagem situadas à montante de voçorocas é o nível mais eficaz de cobertura para controlar a sua expansão. Eles citaram autores que concordam com seus resultados, cujas pesquisas mostraram que um aumento da cobertura vegetal, acima de 60% reduziu significativamente os processos geomorfodinâmicos em ambientes semiáridos (SAUER e RIES, 2008 *in* LI *et al.*, 2015) e que haja pelo menos 50-60% de cobertura vegetal para o controle da erosão em áreas montanhosas na China (LIU *et al.*, 2008 *in* LI *et al.*, 2015). Guerra (2007) também aborda a porcentagem de cobertura vegetal.

Afirma que solos com pouca densidade de cobertura, parcialmente descobertos, ou com menos que 70% de cobertura, podem sofrer maior escoamento superficial e perda de material.

Com relação aos nutrientes, a maior parte da ciclagem de nutrientes nos ecossistemas florestais e agroflorestais tropicais advém da camada de serrapilheira depositada sobre o solo, resultado da quantidade de material caído das plantas e suas taxas de decomposição (ANDRADE *et al.*, 2003; WANG, H. *et al.*, 2018; WANG, Y. *et al.*, 2018; KOOCH *et al.*, 2019; XIONG *et al.*, 2019). Segundo os primeiros autores, com a decomposição da serrapilheira, parte do carbono incorporado na massa vegetal por fotossíntese poderá retornar à atmosfera como CO<sub>2</sub>, levando outros elementos absorvidos a serem reutilizados pelas plantas. A regulação desse mecanismo se dá (1) pela natureza da comunidade de decompositores (macro e microorganismos); (2) pelas características qualitativas do material orgânico (sua degradabilidade); e (3) pelas condições físico-químicas do ambiente, controladas pelo clima e pelas características do solo (ANDRADE *et al.*, 2003; WANG, H. *et al.*, 2018; KOOCH *et al.*, 2019).

Assim, para reativar a ciclagem de nutrientes entre plantas e solos é essencial que sobre ele se forme e se decomponha a serrapilheira, favorecendo a formação de novo horizonte pedológico, adequado ao restabelecimento da vegetação (ANDRADE *et al.*, 2003; ZENG *et al.*, 2018; GU *et al.*, 2019; KOOCH *et al.*, 2019; XIONG *et al.*, 2019). Nesse sentido, é importante, também, contar com o estabelecimento e atuação da fauna edáfica nas melhorias das condições dos solos e da cobertura vegetal. Entre as funções desses organismos estão: ciclagem de nutrientes; decomposição e incorporação de matéria orgânica no solo; ativação de biomassa microbiana e melhoria de características físicas e da estrutura do solo, tais como agregação (formação de macro e microagregados), porosidade, aeração, capacidade de infiltração de água e condutividade hidráulica (EDWARDS e BOHLEN, 1996 *in* BARTZ *et al.*, 2007; SCHEU, 2003 *in* SILVA NETO *et al.*, 2010; AQUINO *et al.*, 2008; BROWN *et al.*, 2015; ALMEIDA, 2016).

Entre os diferentes organismos da fauna edáfica, as minhocas são um dos mais importantes, chamadas de “engenheiras do ecossistema” (denominação que inclui formigas e outros organismos), pois sua atuação alimentar, escavadora e excretora cria estruturas

biogênicas (túneis, galerias, ninhos, câmaras, bolotas fecais) que geram modificações nas propriedades do solo, bem como regulam a disponibilidade de recursos a outros organismos, alterando até mesmo o pH do solo (WOLTER, 2000 *in* AQUINO *et al.*, 2008; DECAËNSA *et al.*, 2001 *in* FREITAS *et al.*, 2015; BROWN e DOMINGUEZ, 2010; LUBBERS *et al.*, 2013; STTEFEN *et al.*, 2013; BROWN *et al.*, 2015; ALMEIDA, 2016; CUNHA *et al.*, 2016).

Práticas conservacionistas, como o uso de adubos verdes, plantio direto, sistemas agroflorestais, silvipastoris e de integração lavoura-pecuária afetam de modo positivo as populações e a biodiversidade da fauna do solo, garantindo constante fornecimento de material orgânico para a fertilidade do solo, estimulando atividades bióticas e favorecendo o crescimento de plantas bem nutridas (AQUINO *et al.*, 2008; BROWN *et al.*, 2015).

A presença de árvores e gramíneas é importante pela influência no microclima local e nas propriedades do solo (BROWN e DOMINGUEZ, 2010). Assim, torna-se sugestivo inserir minhocas e/ou outros organismos da macrofauna, ou da fauna edáfica em geral, em estudos de erosão do solo pode representar uma análise com maior visão holística do sistema.

## **2.2. TÉCNICAS APLICADAS AO ESTUDO DA EROSÃO**

Tradicionalmente, a pesquisa e o ensino de Geomorfologia são desenvolvidos através de técnicas de mensuração diversas, monitoramentos, observações em trabalhos de campo e recursos cartográficos (como cartas topográficas e fotografias aéreas em pares estereoscópicos). Novas tecnologias e a difusão de mídias interativas têm sido aplicadas e integradas a estes métodos mais tradicionais (LIMA, 2012).

Diversas técnicas, em seus diferentes níveis de complexidade, podem ser aplicadas ao estudo da erosão, para medir a produção de sedimentos e as superfícies erodidas (NADAL-ROMERO *et al.*, 2015; NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018). Estes autores dividem tais técnicas em “métodos dinâmicos”, que medem de forma direta a quantidade de sedimentos retirados da encosta ou bacia, e “métodos volumétricos”, que estimam a quantidade de material perdido, através das mudanças na paisagem (MORGAN, 2005; SOLÉ-BENET *et al.*, 2012; NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018).

Entre essas variadas técnicas, convencionais e recentes, estão: (1) estaqueamento, das bordas de voçorocas (GUERRA, 2005b; 2016; MORGAN, 2005; FRANCISCO e NUNES, 2009; LOUREIRO e GUERRA, 2012; LOUREIRO, 2013; TEDESCO, 2015; ETCHELAR, 2017); (2) pinos de erosão, em encostas ou margens de rios (IRELAND *et al.*, 1939; LAWLER, 1993; GUERRA, 2005b; 2016; PERROY *et al.*, 2010; LOUREIRO e GUERRA, 2012; LOUREIRO, 2013; LUFFMAN *et al.*, 2015; PLENNER *et al.*, 2016); (3) uso de estações totais e DGPS (Sistemas de Posicionamento Global Diferencial), para medição de coordenadas geográficas, a fim de gerar modelos digitais das feições (TEDESCO, 2015; GOODWIN *et al.*, 2016; PLENNER *et al.*, 2016; ETCHELAR, 2017; KRENZ e KUHN, 2018); (4) sensoriamento remoto, com inúmeras formas de aquisição e processamento de dados, como aerofotogrametria, imagens de satélites diversos e uso de VANTs (MARZOLFF e POESEN, 2009; SOLÉ-BENET *et al.*, 2012; LOUREIRO e FERREIRA, 2013; TAROLLI, 2014; TEDESCO, 2015; VINCI *et al.*, 2015; CASTILLO e GOMEZ, 2016; GARRITANO *et al.*, 2018a,b; KRENZ e KUHN, 2018; NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018); (5) uso de LiDAR (*Light Detection and Ranging* – detecção de distâncias através da luz), para varreduras a laser, realizadas de modo aerotransportado ou terrestre (BONILLA, 2008; SOLÉ-BENET *et al.*, 2012; TAROLLI, 2014; TEDESCO, 2015; VINCI *et al.*, 2015; CASTILLO e GOMEZ, 2016; GOODWIN *et al.*, 2016; PLENNER *et al.*, 2016; ETCHELAR, 2017; KRENZ e KUHN, 2018; NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018); (6) reconstrução de fotografias 3D (JAMES *et al.*, 2012; GÓMEZ-GUTIÉRREZ *et al.*, 2014; KAISER *et al.*, 2014; CASTILLO *et al.*, 2015; CASTILLO e GOMEZ, 2016); entre outras.

A literatura aponta que as medições morfológicas simples, convencionais, ainda representam os métodos dominantes (GUERRA, 2005a; 2016; MORGAN, 2005; CASTILLO e GOMEZ, 2016; POESEN, 2018). Segundo Castillo e Gomez (2016), as estimativas lineares e de área representam 53% dos estudos que analisam os níveis de degradação e outros 20% correspondem a estudos que calculam o volume de voçorocas a partir de medições 2D. Por outro lado, também afirmam que técnicas de sensoriamento remoto e ferramentas avançadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm contribuído sobremaneira para produzir conjuntos de dados de alta resolução, ainda que sejam apresentados, frequentemente, enquanto pesquisas únicas.

Há quase duas décadas, o desenvolvimento de novas técnicas de sensoriamento remoto vem causando um aumento sem precedentes das informações sobre a superfície do

planeta, fornecendo bases à geração de novos métodos de análise da sua superfície, em busca de melhor compreensão dos processos e formas do relevo. Tecnologias para obtenção de dados topográficos de alta resolução, como *LiDAR (Light Detection and Ranging – detecção de distâncias através da luz)*, abrem importantes caminhos na análise de movimentos de massa, processos erosivos nas encostas e nos rios, morfologia fluvial, tectônica e vulcanismo, bem como nas impressões antropogênicas geradas no relevo (TAROLLI *et al.*, 2009; TAROLLI, 2014; VINCI *et al.*, 2015; ETCHELAR, 2017).

Destaca-se que a escolha de técnicas e métodos específicos para um estudo depende de vários fatores, como recursos financeiros e tempo disponíveis, processos específicos a se estudar, principais objetivos e, não menos importante, características da área de estudos (NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018).

Portanto, nas seções seguintes são discutidas as técnicas selecionadas, nesta pesquisa, para monitorar processos erosivos. Entre as quais: técnicas convencionais (estaqueamento e pinos de erosão) e geotecnologias variadas, com prós e contras de cada técnica e o que tem sido esperado de seus usos. Salienta-se que há, ainda, diversas técnicas que não puderam ser contempladas.

### **2.2.1. Estacas e Pinos de Erosão**

O monitoramento de áreas com voçorocamento e o mapeamento da evolução dessas feições é, frequentemente, realizado através da aplicação do método de estaqueamento (GUERRA, 2005b, 2016; MORGAN, 2005; LOUREIRO, 2013; ETCHELAR, 2017). Segundo Tedesco (2015), é a técnica mais utilizada no Brasil e no mundo, pois é barata, simples e de fácil execução (GUERRA, 2005b; 2016; MORGAN, 2005; LOUREIRO, 2013).

Contudo, é importante deixar claro que o uso das estacas quantifica somente o recuo das bordas de voçorocas, com medidas espacialmente pontuais, não sendo capaz de medir volumes (FRANCISCO e NUNES, 2009; LOUREIRO, 2013). Este autor, ao utilizar estacas em uma voçoroca na bacia do rio São Pedro, município de Macaé/RJ, verificou um problema comum a este tipo de monitoramento ao ser aplicado em locais sem cercamento. O gado presente na área de estudo foi responsável pela retirada de diversas estacas de controle, o

que impossibilitou mensurar a voçoroca com as estacas em alguns pontos específicos e diversos momentos da pesquisa (LOUREIRO, 2013).

O método dos **pinos de erosão** foi aplicado, pioneiramente, por Ireland *et al.* (1939), para monitorar a erosão nas paredes de voçorocas, nos Estados Unidos (LAWLER, 1993; SAYNOR *et al.*, 2003; SAYNOR e ERSKINE, 2006; PERROY *et al.*, 2010; LUFFMAN *et al.*, 2015). *Iron rods* (hastes de ferro) – hoje, *erosion pins* (pinos de erosão) – foram utilizados como marcadores para medir a taxa de escavação provocada por quedas d'água – *plunge pools* – nas paredes das cabeceiras das voçorocas.

Já Wolman (1959) foi o primeiro a aplicar esse método para monitorar a erosão em margens de rios – *river banks* – (HOOKE, 1979; THORNE, 1981; LAWLER, 1993; BRADBURY *et al.*, 1995; CUNHA, 1996; MOTA, 2001; CASADO *et al.*, 2002; SAYNOR *et al.*, 2003; SAYNOR e ERSKINE, 2006; SANTOS, 2006; SASS, 2011; BRADBURY, 2011 e 2013; HUANG, 2012; WILLETT *et al.*, 2012; SANTOS, 2013; TUFEKCIOGLU *et al.*, 2013; PALMER *et al.*, 2014; POPE e ODHIAMBO, 2014). Segundo Lawler (1993), o trabalho de Wolman (1959) se manteve, durante os anos de 1960, como o único publicado a utilizar a metodologia.

Fanning (1994) menciona que havia poucos estudos que tivessem utilizado os pinos de erosão para determinar taxas de erosão e perda de solo, de modo geral. A autora, que utilizou os pinos para avaliar a diminuição de material de solo na superfície da encosta, deixou fora de suas análises o trabalho de Crouch (1987, *in* FANNING, 1994). Tal estudo, foi o primeiro, desde Ireland *et al.* (1939), a aplicar o método para medir o recuo de paredes de voçorocas, ou seja, após 48 anos. Na literatura internacional, além dos trabalhos citados, há três mais recentes (BARTLEY *et al.*, 2007; WHITFORD *et al.*, 2010; LUFFMAN *et al.*, 2015) utilizando os pinos de erosão no interior de voçorocas. Alguns outros citaram este tipo de aplicação, sem utilizá-la (LAWLER, 1993 e 2005; SAYNOR *et al.*, 2003; SAYNOR e ERSKINE, 2006; PERROY *et al.*, 2010; HANCOCK e LOWRY, 2015).

Bartley *et al.* (2007) abordam diversos elementos e processos da erosão por voçorocas e as relações com canais fluviais. As voçorocas foram monitoradas de acordo com sua morfologia, levando à aplicação dos pinos de maneiras diferentes para cada segmento de uma mesma voçoroca. Whitford *et al.* (2010) também aplicaram os pinos de erosão nas paredes laterais de voçorocas monitoradas, porém, a morfologia da feição é muito diferente

do que se esperaria para esse tipo de estudo, considerando os trabalhos já citados. Nestes, as paredes apresentam angulação e declividades mais acentuadas do que no estudo de Whitford *et al.* (2010), onde a feição erosiva é rasa e assemelha-se a uma encosta côncava. Também com uma classificação morfológica das voçorocas, Luffman *et al.* (2015) analisam o monitoramento com dados da relação entre a precipitação e as diferentes formas das voçorocas. Contudo, suas áreas também apresentam baixas declividades. Assim, enquanto a teoria menciona pinos de erosão nas paredes da voçoroca, a prática reflete como se fossem usados na superfície da encosta. Fala-se em rebaixamento do solo, típico fato de quando os pinos estão dispostos no topo do solo.

Em âmbito nacional, seja por falhas de divulgação, acesso ou não realização de pesquisas com essa aplicação metodológica, dos pinos nas paredes de feições erosivas, o trabalho de Loureiro (2013), vem sendo considerado o pioneiro no resgate da aplicação original de Ireland *et al.* (1939). Mesmo na literatura internacional, uma larga pesquisa bibliográfica, até o presente, não resultou em referências a trabalhos como os de Ireland *et al.* (1939) e Crouch (1987 *in* FANNING, 1994), com tal aplicação do método.

Por isto, foi considerado que a proposta seria uma adaptação ao método dos pinos, que ficou mais conhecido por dois tipos de uso. Um destes usos é a medição da erosão laminar na superfície das encostas (HAIGH, 1978; STOCKING, 1987; GUERRA, 1996 e 2005b; VANDEKERCKHOVE *et al.*, 2001; FULLEN e CATT, 2004; BARTLEY *et al.*, 2007; SPERANDIO *et al.*, 2012; HANCOCK *et al.*, 2015). O outro tipo é a medição da erosão e da deposição dos materiais de solo nas margens dos rios (WOLMAN, 1959; HOOKE, 1979; THORNE, 1981; LAWLER, 1993 e 2005; CUNHA, 1996; MOTA, 2001; CASADO *et al.*, 2002; COUPER *et al.*, 2002; PEPPLER e FITZPATRICK, 2005; SAYNOR e ERSKINE, 2006; SILVEIRA *et al.*, 2013; PALMER *et al.*, 2014; POPE e ODHIAMBO, 2014). Curiosamente, essa “adaptação” nada mais é do que a origem do método, enquanto suas aplicações mais “famosas” são, de fato, suas adaptações.

### 2.2.2. Geotecnologias no estudo da erosão

As pesquisas sobre a paisagem geomorfológica e sua dinâmica têm, cada vez mais, lançado mão do uso das geotecnologias em suas análises e monitoramentos. Imagens de diferentes fontes e níveis de precisão podem ser utilizadas de variadas formas e finalidades, de acordo com objetivos e possibilidades de cada estudo, constituindo-se recursos cada vez mais importantes nas análises geomorfológicas. São imagens como as de diversos satélites e radares, com diferentes sensores e sistemas de transporte (ALOS, ASTER, CBERS, GeoEye, Ikonos, Landsat, Quickbird, RapidEye, SPOT, WorldView, etc.), *Google Earth*, Ortofotomosaicos (Ortofotos do IBGE, por exemplo), bem como, dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), e o uso, mais recentemente, de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) e de sistemas de varredura a laser aerotransportados ou terrestres.

Assim como monitorar a erosão em campo e estimar seu volume através de métodos tradicionais, com caixas coletoras de sedimentos, pinos de erosão ou pontes de erosão, exige muito trabalho e tempo empenhados, os mapeamentos de detalhe, com estações totais ou varreduras a laser terrestre, também o fazem, inclusive dependem da acessibilidade das feições que serão monitoradas (KRENZ e KUHN, 2018). Contudo, os métodos convencionais carecem de densidade de pontos maior, suficientes para captura mais precisa da variabilidade espacial da feição, necessitando de vários anos de monitoramento para gerar extrapolações mais confiáveis (PLENNER *et al.*, 2016; KRENZ e KUHN, 2018).

Dados LiDAR podem ser obtidos por veículos aéreos ou terrestres, estes a partir de posições fixas, com uso de tripé, ou ainda, em plataformas *offshore* (VINCI *et al.*, 2015). O LiDAR aerotransportado possui alta resolução espacial, podendo varrer grandes áreas, mas ainda perde detalhes, como nas faces de margens de rios (PLENNER *et al.*, 2016). Isto se aplica, também, às paredes de voçorocas. O *Laser Scanner Terrestre* (LST), como um dos mais novos métodos de levantamento de alta resolução espacial, possui rapidez e precisão, não são intrusivos (como métodos tradicionais manuais), tem fácil implementação e são automatizados, embora seus *softwares* de processamento sejam caros (PLENNER *et al.*, 2016).

Entre estas técnicas aplicadas em campo, antigas e manuais ou modernas e automatizadas, há as demais técnicas de aquisição de dados da superfície. Produtos derivados de dados SRTM, por exemplo, são importantes, porém, sua melhor resolução espacial, de 30 m x 30 m, não é suficiente para precisar perdas de solo (MONDAL *et al.*, 2017a, b; KRENZ e KUHN, 2018). O uso de estações totais, por exemplo, é adequado para medições de larga escala, mas de baixa resolução, geralmente obtendo-se seções transversais de canais (fluviais e erosivos) ou documentando a descarga de sedimentos (PLENNER *et al.*, 2016). Ainda assim, Goodwin *et al.* (2016) verificaram forte concordância entre dados de estação total e dados de elevação adquiridos com *Laser Scanner* Terrestre.

Segundo Krenz e Kuhn (2018), os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) podem suprir lacunas entre medições terrestres dispendiosas e demoradas e a insuficiente disponibilidade ou qualidade de dados de imagens de satélite ou aéreas de resoluções inferiores. São, portanto, uma recente tecnologia de sensoriamento remoto, cujo uso tem crescido significativamente nas análises da superfície terrestre (VINCI *et al.*, 2015). Estes autores citam, também, a câmera “Tempo-de-Voo” (*Time-of-flight*) ou de alcance, nova geração de sensores ativos, que permite aquisição de nuvem de pontos 3D sem necessidade de mecanismos de varredura, partindo apenas de um ponto de visada.

É importante notar, a partir das diversas técnicas existentes, que o uso de mais de uma dessas ferramentas, em um mesmo estudo, pode representar uma forma de se obter resultados mais detalhados e conexos, já que uma ferramenta pode suprir alguma deficiência da outra, ou trazer resultados que não seriam possíveis sem seu uso conjunto.

Assim, esta tese traz análises de resultados, a partir do uso de algumas dessas geotecnologias, discutidas conceitualmente adiante, sendo elas: (1) Ortofotos (fotografia aérea), do IBGE; (2) imagens do *Google Earth Pro*; (3) imagens 3D, geradas com um aparelho de escaneamento terrestre a laser (*Terrestrial Laser Scanner – TLS*); e (4) imagens aéreas tomadas com o uso de *Drone*, que é classificado como Veículo Aéreo Não Tripulado devido ao uso em pesquisa científica (SIEGLE, sem ano. Disponível em: <http://www.io.usp.br/index.php/infraestrutura/museu-oceanografico/51-portugues/publicacoes/series-divulgacao/equipamentos-e-tecnologias/824-drones-e-veiculos-aereos-nao-tripulados-vant>, acesso em 20 de julho de 2019).

### 2.2.2.1. Imagens de Satélite

Até a última década (2000-2010), as fotografias aéreas vinham sendo muito utilizadas em pesquisas ambientais, uma vez que sua resolução espacial (tamanho do pixel) alcançava escalas de maior detalhe. Mas, comparadas às imagens de satélite, que também têm sido muito utilizadas a partir desta mesma época, pecam por não possuírem resolução espectral e radiométrica, inviabilizando análises mais sofisticadas, a exemplo do tipo de solo e presença de matéria orgânica (LOUREIRO e FERREIRA, 2013). Soma-se a isto o fato de que as fotografias aéreas são de anos muito anteriores, ou seja, não sofrem atualizações. Além disso, até mesmo a resolução espacial de determinadas imagens de satélite tornou-se melhor, inclusive sendo tomadas mais recentemente.

Muitas pesquisas usam o sensoriamento remoto na análise e mensuração da degradação do solo, pois o processamento digital permite monitorar de forma multitemporal e multiespectral os processos erosivos, contribuindo para melhor visualização dos resultados da erosão (PEREZ e GARCIA, 2017). A principal função do Processamento Digital de Imagens (PDI) é fornecer ferramentas que facilitem identificar e extrair informações contidas nas imagens, para que possam ser interpretadas posteriormente (SILVA, 2001; TEIXEIRA *et al.*, 2018). O PDI pode ser realizado com uso de inúmeros *softwares* no Brasil, a exemplo dos comercializados ArcGIS, Envi, Idrisi e E-Cognition, e dos chamados “softwares livres”, como QuantumGIS (QGIS) e SPRING (desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE), entre tantos outros (LOUREIRO e FERREIRA, 2013).

São imagens de sensoriamento remoto ortorretificadas, tanto aquelas obtidas por levantamentos aéreos, quanto oriundas de satélites, significando que ambas possuem projeção ortográfica, ou seja, em três dimensões (FITZ, 2010). Em estudos sobre voçorocas, de acordo com Tedesco (2015), o uso de imagens de média resolução espacial – como Landsat, CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*), SPOT (*Satellite Pour l’Observation de la Terre*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e dados de altimetria do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) – limita-se apenas a localizar essas feições, impossibilitando monitorá-las, devido à insuficiência da resolução espacial dos dados. O ganho no uso de imagens de alta resolução espacial está na

possibilidade de não apenas localizar, mas também delimitar as voçorocas – como as imagens dos sensores Ikonos, QuickBird, WorldView, RapidEye e GeoEye (SANTOS e FARIA, 2011).

Cabe destacar a existência do modelo SRTM *Plus*, com resolução espacial de 30 metros, que pode ser usado em escala 1:50.000, conforme a área de estudo (LOUSADA e FERNANDES, 2017). Estes autores verificaram que o SRTM *Plus* se mostrou superior a outros modelos, como ASTER GDEM 2, TOPODATA e ALOS *World 3D*.

Devido ao alto custo de imagens de alta resolução, como Ikonos e GeoEye (LOUREIRO e FERREIRA, 2013; SAADAT *et al.*, 2014; ETCHELAR, 2017), somado ao baixo investimento em pesquisa no Brasil, seu uso é inviabilizado muitas vezes, restando como alternativa imagens de resolução mais baixa e disponibilizadas de forma gratuita, como Landsat 5 e CBERS 2, através do INPE (LOUREIRO e FERREIRA, 2013). Imagens *RapidEye*, com resoluções espacial e temporal melhores que estas últimas, podem ser obtidas através do Ministério do Meio Ambiente (MMA). Além dessas, atualmente o INPE disponibiliza imagens Landsat 6, 7 e 8 e CBERS 3 e 4, sendo estas duas, de acordo com Florenzano (2011), de alta resolução espacial e temporal, 5 m e 5 dias, respectivamente. Nesta lista de imagens de satélite, com livre acesso, Etchelar (2017) inclui as disponíveis, através do *Google Earth*, provenientes de satélites com resoluções espaciais e temporais variadas, possuindo vantagens e desvantagens, abordadas mais à frente.

Também os dados SRTM possuem algumas desvantagens, dentre as quais a sensibilidade do sensor referente a quaisquer objetos dispostos na superfície, desde antenas e edificações até variações da cobertura vegetal, significando um limite quanto à precisão da altimetria dos dados deste sensor (VALERIANO, 2008; MARION *et al.*, 2015; PANTOJA, 2018; PEREIRA *et al.*, 2019). Assim, se diferenciam modelos digitais de superfície (MDS) e modelos digitais de terreno (MDT). Ambos representam a superfície física da Terra, com a diferença que o primeiro inclui os objetos naturais e artificiais acima dela, enquanto o segundo exclui os referidos objetos acima do solo (RODRIGUES AA, 2016). Este autor explica que a fotogrametria é a ciência usada na geração de MDTs e ortofotografias, “cuja junção origina o ortomosaico”, através dos métodos de malha regular, TIN (rede triangular) e intersecção espacial, que determina as coordenadas tridimensionais no terreno.

### 2.2.2.2. *Google Earth*

De acordo com Lima (2012), o *software Google Earth*, lançado em 2004 e disponibilizado em 2005, atende a diversos tipos de usuários, desde motoristas a pesquisadores, passando pelo simples entretenimento de exploradores e curiosos, por meio da visualização de múltiplas camadas de informação espacial. O acesso popularizado e democrático a informação geográfica leva-o a ser considerado por especialistas como uma das grandes conquistas cartográficas do século XXI (LIMA, 2012).

O *Google Earth* disponibiliza, gratuitamente e para uso sem fins lucrativos, imagens de satélites, de diferentes resoluções espaciais e temporais (Landsat, GeoEye, Ikonos e Quickbird), e tem sido, por isso, uma ferramenta relevante na compreensão da paisagem, de forma rápida e eficaz (LOUREIRO e FERREIRA, 2013; BENAVIDES-VARELA *et al.*, 2016).

Através do recurso “imagens históricas” é possível realizar análises temporais na área desejada. Pois esta seção possui um conjunto de imagens de datas anteriores à última disponibilizada, sendo esta, normalmente, do ano anterior, ou do ano vigente. Segundo Lima (2012), cidades da Europa e dos Estados Unidos possuem imagens a partir da década de 1940; enquanto as capitais brasileiras contam com imagens de alta definição a partir do ano 2000. Esta é, portanto, uma das ferramentas mais importantes do *Google Earth*, pois permite avaliar os processos atuantes na transformação da paisagem ao longo do tempo.

Esse recurso foi utilizado por Coelho Netto *et al.* (2011) para demonstrarem e analisarem o antes e depois da catástrofe da Região Serrana do Rio, no mês de janeiro daquele ano. Com as imagens do *Google Earth* (neste caso, do satélite GeoEye) os autores puderam contabilizar as cicatrizes de deslizamento e mensurar suas áreas, indicando a magnitude do evento e sua distribuição espacial.

As imagens com alta resolução são muito importantes no estudo de processos erosivos, com maior precisão e agilidade que a maioria das imagens de satélites disponíveis gratuitamente no Brasil, que possuem resolução espacial média a baixa e necessitam, geralmente, de algum processamento para serem analisadas, demandando mais tempo (LOUREIRO e FERREIRA, 2013).

O *Google Earth* foi comparado a imagens do satélite ALOS por Castro *et al.* (2010) para mapear feições erosivas e cicatrizes de escorregamentos por unidade de relevo e uso e cobertura da terra. Constataram que o *software* da *Google* foi bem mais eficiente na identificação das feições estudadas, com melhor resolução, do que a imagem do sensor Prism do referido satélite, apesar de sua resolução espacial de 2,5 m.

Marchioro e Oliveira (2014) utilizaram, conjuntamente, uma imagem de satélite do *Google Earth*, do ano de 2014, advinda do satélite Spot 7, com seis metros de resolução, e duas ortofotos, dos anos de 1970 e 2007, com 30 metros de resolução, disponibilizadas pelo Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Estado do Espírito (IDAF) Santo e pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo (IEMA), respectivamente. Seu objetivo era verificar a evolução da erosão relacionada a estrada ES-482, constatando que entre 2007 e 2014 três voçorocas se tornaram uma só. Em ambiente GIS, calcularam a área e perímetro das feições em cada ano, obtendo resultados expressivos.

Além das “imagens históricas”, outros recursos disponíveis, listados por Lima (2012), para uso em pesquisas geomorfológicas são: (1) a “visualização 3D”, possível através de um modelo digital de elevação (MDE), produzido com dados SRTM da NASA; (2) o “mapeamento”, com ferramentas que permitem a edição de vetores sobre as imagens (pontos, linhas e polígonos), representando cartograficamente os elementos desejados; (3) a importação e exportação de dados de ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), ou GIS, que significa que dados produzidos em diferentes plataformas podem ser visualizados no *Google Earth*, de modo direto na versão profissional (*Pro*), e por conversão ao formato KML (extensão do *software* da *Google*), na sua versão livre; e (4) o “perfil de elevação”, com a possibilidade de traçar linhas para perfil e a consequente geração de gráficos, com eixo X (distância) e Y (elevação), devido aos dados SRTM, conforme citado.

As imagens disponibilizadas pelo *software* têm sido úteis, também, para levantamentos pré-campo e verificações pós-campo, devendo possuir checagem em campo, com GPS e registro fotográfico, para elucidar situações de dúvida (ZUQUETTE e GANDOLFI, 2004; ROSS e FIERZ, 2009; CASTRO *et al.*, 2010; LOUREIRO e FERREIRA, 2013; BOARDMAN, 2016).

Ainda que a utilização de imagens do *Google Earth* venha sendo comprovadamente relevante (LOUREIRO e FERREIRA, 2013; BOARDMAN, 2016), conforme os diversos estudos demonstram, há ressalvas a sua aplicação acadêmica, uma vez que não existem no *software*, “convenções que garantam padrões de precisão cartográfica e de posicionamento” (LIMA, 2012; BOARDMAN, 2016). Ou seja, o *Google Earth* não possui precisão cartográfica.

Diferentes níveis de correção das imagens não discriminados; informações vetoriais sem rigidez de precisão (LIMA, 2012); indisponibilidade de imagens de alta resolução para uma dada área em sua totalidade; imageamento com periodicidade temporal irregular (BOARDMAN, 2016); diferenças de escala cartográfica; diferenças de angulação na tomada da imagem; entre outros, são alguns dos problemas que podem ser enfrentados (LOUREIRO e FERREIRA, 2013).

Além disso, o fato de as bandas espectrais das imagens oferecidas não serem disponibilizadas, limita apenas ao mapeamento visual a identificação das feições estudadas, podendo não retratar adequadamente a realidade da área (LOUREIRO e FERREIRA, 2013).

Ainda assim, o uso dos recursos disponíveis, seja para fins comerciais, de pesquisa e ensino, torna o *Google Earth* uma realidade. Pois, cada vez mais são desenvolvidas e discutidas atividades de pesquisa e pedagógicas, na Geografia e, principalmente, na Geomorfologia, publicadas em congressos, artigos em periódicos científicos, dissertações e teses, superando seu objetivo inicial, de visualização (LIMA, 2012). Este autor (op. cit.) afirma que o *software* trouxe novas perspectivas de análise, complementando e melhorando métodos tradicionais consagrados academicamente.

Neste sentido, o *Google Earth* tem sua importância e posicionamento nesta Tese. Sendo a primeira referência nas atividades pré-campo, na busca por feições erosivas e caminhos a serem seguidos, e a primeira fonte pós-campo para comprovação dos lugares visitados. Além disso, seu uso conciliado com outras técnicas e geotecnologias, o torna mais atuante e complementar na análise dos resultados. Isto, portanto, confirma algumas das potencialidades discutidas aqui.

### 2.2.2.3. Laser Scanner Terrestre – LST (*Terrestrial Laser Scanner – TLS*)

O Escâner a Laser Terrestre, em tradução livre, ou *Laser Scanner Terrestre* (LST) (ETCHELAR, 2017) – traduções do original em inglês *Terrestrial Laser Scanner (TLS)* – é uma tecnologia recente, que tem sido aprimorada e difundida aos poucos nas geociências (BONILLA, 2008; TAROLLI, 2014; GOODWIN *et al.*, 2016; PLENNER *et al.*, 2016). Utiliza a tecnologia de detecção de distâncias através da luz, conhecida internacionalmente como LiDAR (*Light Detection and Ranging*), para mapear digitalmente formas e objetos com alta resolução, na casa dos milímetros e centímetros (BONILLA, 2008; SOLÉ-BENET *et al.*, 2012; PRETI *et al.*, 2013; ETCHELAR, 2017).

O escaneamento é o processo através do qual o sistema cria uma representação virtual do alvo escolhido. Assim, a tecnologia LiDAR realiza a aquisição de milhares, a milhões de pontos com coordenadas tridimensionais, medindo ângulos (azimute e zênite) e distâncias, através da velocidade da luz em ser emitida e refletida de volta (VINCI *et al.*, 2015; ETCHELAR, 2017). Esse conjunto de pontos gerados no processo de aquisição forma a chamada nuvem de pontos, que será a base para a modelagem 3D de superfícies diversas (BONILLA, 2008; VINCI *et al.*, 2015; ETCHELAR, 2017), desde uma feição geomorfológica até um veículo automotor, por exemplo. Cada medida individual do alvo gera esses pontos, sendo que cada um deles terá coordenadas **x**, **y** e **z** (BONILLA, 2008; VINCI *et al.*, 2015; GOODWIN *et al.*, 2016; ETCHELAR, 2017). A medição destas é semelhante ao processo realizado por estações totais, que medem as coordenadas, através das distâncias que o aparelho registra, bem como os ângulos horizontais e verticais (FERRAZ *et al.*, 2016; ETCHELAR, 2017).

Além da posição em três dimensões, o LST registra cor natural (quando possuem câmera acoplada) e intensidade de reflexão, que significa a intensidade de retorno de sinal, em outras palavras, a interação de alvos com a superfície como função do comprimento da onda do feixe laser (ROCHA, 2002; FERRAZ *et al.*, 2016; ETCHELAR, 2017).

A tecnologia LiDAR (aerotransportada ou terrestre), então, fornece dados de alta resolução da topografia, com claras vantagens sobre técnicas tradicionais de levantamento (SLATTON *et al.*, 2007; TAROLLI, 2014; VINCE *et al.*, 2015). Comparando com técnicas fotogramétricas convencionais, o LST tem duas capacidades muito importantes: (1) gerar

dados da topografia do solo, ao filtrar a vegetação e outros objetos de forma automática; e (2) produzir modelos digitais de terreno (MDTs) com resoluções altamente detalhadas, inferiores a um metro e modelos digitais de superfície (MDS) para grandes áreas (TAROLLI, 2014; VINCE *et al.*, 2015).

O que garante a potencialidade do uso do LST é sua alta densidade de amostragem, a precisão posicional (x, y, z) que chega a escala inferior aos centímetros, elevada automação, flexibilidade das configurações de pesquisa e facilidade de uso do hardware, além da capacidade de vincular várias varreduras em uma (BONILLA, 2008; MONSERRAT e CROSETTO, 2008; GOODWIN *et al.*, 2016). Segundo Etchelar (2017), o LST de posição fixa possui precisão no intervalo de até 1-2 mm, com velocidade de varredura de até um metro pontos por segundo.

A coleta e o pós-processamento de dados deste tipo de sistema, originalmente criado para engenharia e estruturas, ainda não são bem desenvolvidos (BONILLA, 2008), permanecendo “em sua infância”, de acordo com Goodwin *et al.* (2016). Porém, as dezenas de milhões de pontos gravados por escaneamento permite a pesquisa de ambientes complexos da geomorfologia, com maior detalhe e rapidez do que levantamentos tradicionais com estação total e pinos, por exemplo, e a repetição das pesquisas sendo relativamente baratas (GOODWIN *et al.*, 2016). Assim, é necessário desenvolver práticas de coleta e análise de dados de LST, para estudos de erosão por voçorocas, confiando que, à medida que mais projetos com uso desta tecnologia forem concluídos, haverá maior compartilhamento de procedimentos de aquisição em campo, processamento de dados, validação e comparação de novos métodos (BONILLA, 2008; GOODWIN *et al.*, 2016).

Devido ao mapeamento em escala de detalhe, *Laser Scanners* Terrestres têm sido utilizados nos últimos anos para ambientes fluviais e de voçorocas (BREMER e SASS, 2012; KOCIUBA *et al.*, 2014; GOODWIN *et al.*, 2016). Estes últimos autores afirmam que a varredura a laser terrestre (LST) é uma “ferramenta poderosa” para quantificar a morfologia de voçorocas e monitorar mudanças ao longo do tempo. Ressaltam, porém, que garantir que os resultados sejam corretamente interpretados requer pesquisas que testem a replicabilidade dos produtos gerados pelo LST, o que permitirá quantificar a precisão das medidas e separar mudanças “falsas” das “reais” (GOODWIN *et al.*, 2016).

Petri *et al.* (2013) utilizaram tanto LiDAR aéreo quanto LST, para verificar o risco à erosão em vinhedos na Toscana, Itália, e atestaram a eficácia da alta resolução topográfica proporcionada como ferramenta útil para a gestão e planejamento do uso da terra. Assim, integrar dados de LST e dados de LiDAR aerotransportado pode ser uma abordagem muito interessante, que melhore a compreensão de processos de controle de risco à erosão (BONILLA, 2008; PETRI *et al.*, 2013).

Já Vince *et al.* (2015) compararam o métodos de medição manual e por LST em ravinas e concluíram que o volume total das ravinas foram superestimados em cerca de 15% pela pesquisa manual. Segundo os autores, uma razão para isso seria o fato de que o LST, devido à densidade da nuvem de pontos, considera nos cálculos as sinuosidades das feições erosivas. Significa que as medidas manuais consideram as feições mais retas, para fins de cálculo.

Vale lembrar que, apesar de ser uma alternativa a métodos topográficos convencionais, espacialmente limitados e consumidores de tempo e trabalho, o LST necessita de deslocamento e instalação na área de estudo, em diferentes posições, o que pode implicar em movimentação sobre as feições erosivas e demandar tempo para a aquisição dos dados (TEDESCO, 2015), fatores que devem ser sempre considerados.

No fim, o grande diferencial dos LSTs é sua geometria de visada, que possibilita gerar vários produtos: modelos de superfície; perfis topográficos; extração de curvas de nível; identificação de dutos (*piping*); quantificação do volume erodido; e outros (MORAES, 2016; Etchelar, 2017). Pois tais produtos seriam mais difíceis de obter com a mesma precisão através de outras técnicas de levantamento. Por tudo isso, é interessante analisar o processo erosivo utilizando-se diferentes técnicas, de modo que possam gerar análises e interpretações mais completas.

#### **2.2.2.4. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)**

Os VANTs, em sua variedade de modelos (*aviões, drones, asa fixa, “multicópteros”*), enquanto tecnologia de sensoriamento remoto para aquisição de imagens têm recebido cada vez mais interesse e aplicações em seus usos. Entre as razões para isso está o controle

da aquisição das imagens por parte dos usuários, e o potencial de variação de escalas e resoluções que estes equipamentos disponibilizam, diferentemente de imagens obtidas por aeronaves tripuladas convencionais e sensores de satélite. Apresentam-se, inclusive, como método econômico, além de permitir a adequação de levantamentos e produtos de acordo com o tamanho dos objetos analisados, os processos monitorados, e a velocidade com que mudanças ocorrem na paisagem, levando às melhores resoluções espaciais e temporais para as questões ou aplicações das pesquisas (D'OLEIRE-OLTMANN *et al.*, 2012).

Logo, utilizar VANTs apresenta grandes vantagens, tais como: menor influência de obstruções, uma vez que a visão da câmera não é estacionária, a exemplo de aparelhos de escâner a laser; serem baratos, comparados a outras formas de obtenção das imagens; maior rapidez na aquisição de dados e geração de produtos específicos, como modelos digitais de terreno e ortofotomosaicos; recobrir áreas que possuam limitações de acesso; fácil portabilidade; e periodicidade à escolha do usuário (NAVES SILVA *et al.*, 2015; LONGHITANO *et al.*, 2016; GARRITANO *et al.*, 2018a,b, 2019; KRENZ e KUHN, 2018).

Interessante e importante frisar a ideia de que imagens de alta resolução obtidas com VANTs possibilitam preencher com sucesso uma lacuna na escala dos dados, inclusive quando combinadas com imagens terrestres complementares (D'OLEIRE-OLTMANN *et al.*, 2012; STÖKER *et al.*, 2015; KRENZ e KUHN, 2018). Como exemplo dessa lacuna, há a falta de informação às vezes geradas por sinuosidades nas paredes de voçorocas (STÖKER *et al.*, 2015), problema que pode ser solucionado com uso de VANTs. Por isso, estudos vêm tratando do monitoramento ou avaliação da extensão de voçorocas através dos VANTs (NEUGIRG *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2016; KRENZ e KUHN, 2018).

Em outras palavras, D'Oleire-Oltmanns *et al.* (2012) explicam que a escala dos dados de campo traz um contato direto e de resolução potencialmente ilimitada com o objeto de estudo, enquanto a escala dos dados obtidos por satélite documenta de forma permanente e espacialmente contínua um estado momentâneo com resolução menor. Assim, há níveis de escala intermediários, ou seja, a lacuna citada, possuidora de alto potencial para aquisição e análise de dados através do uso de VANTs. Krenz e Kuhn (2018) mostraram em seu estudo o melhor desempenho das imagens obtidas com VANT para identificar

voçorocas, comparando com imagem de satélite de alta resolução, tanto em relação ao investimento de tempo como pela precisão.

O tempo de processamento, aliás, vem diminuindo cada vez mais, graças ao avanço da tecnologia (KRENZ e KUHN, 2018). Estes autores verificaram, ainda, que cálculos de volume baseados no uso de VANT resultam em estimativas mais representativas do que medições de campo tradicionais, em função da maior resolução dos dados topográficos.

Significa que câmeras ou *scanners* acoplados aos VANTs são capazes de recobrir e mensurar áreas e objetos de estudo com maior detalhe e precisão, e menor tempo, do que os pesquisadores podem realizar com métodos tradicionais e observações em campo. Isto é devido a algumas possibilidades tecnológicas disponíveis, como a capacidade de gerar nuvens de pontos, tal qual os aparelhos de escâner à laser, que permite um recobrimento detalhado inalcançável ao pesquisador com medidas tradicionais; a tomada de imagens com bandas, tal qual os satélites, porém com um nível de detalhe e posicionamento privilegiado; entre outras.

VANTs mais sofisticados apresentam possibilidade de ter seu voo planejado previamente ao trabalho de campo para tomada das imagens, além de contar com a sobreposição regular e uniformemente espaçada de dezenas de imagens, que compõem um mosaico com maior eficiência de precisão e detalhamento (D'OLEIRE-OLTMANNNS *et al.*, 2012; GARRITANO *et al.*, 2018a,b).

Cabe destacar que o uso de VANTs para medição e mapeamento requer, de modo fundamental, o georreferenciamento e a correção geométrica das imagens. Bem como a colocação de pontos de controle no solo (PCs) pode ser um meio de facilitar esses ajustes das imagens ou, ainda, ser uma técnica indispensável para o processamento dos dados (D'OLEIRE-OLTMANNNS *et al.*, 2012). Por outro lado, pode haver aplicações de VANT que não necessitem tais esforços, resultando em soluções mais simples que sejam suficientes, de acordo com os objetivos ou possibilidades de cada pesquisa, a depender das características de imagem e relevo (D'OLEIRE-OLTMANNNS *et al.*, 2012).

Vale apontar que há uma óbvia carência de dados de referência, no nível de resolução alcançado pelos VANTs, que é comum aos estudos que se utilizam desse recurso

(D'OLEIRE-OLTMANN *et al.*, 2012), por ser ainda recente, embora não seja mais novidade. Ou seja, há um vasto potencial a se desenvolver através da aplicação de VANTs no estudo em detalhe dos processos erosivos.

O VANT é, portanto, uma valiosa ferramenta, quando há necessidade de precisão nos dados, com capacidade na faixa de milímetros a centímetros (HU *et al.*, 2018). Em especial para situações nas quais as medições tradicionais, como estacas e pinos de erosão, e mesmo aquelas com escaneamento a laser terrestre, sejam demasiadamente trabalhosas (KRENZ e KUHN, 2018). Soma-se a facilidade de ajuste das resoluções espacial e temporal, de acordo com os objetivos de cada projeto, desde eventos individuais (antes e depois) até eventos de rotina, possibilitando fotografias em diferentes escalas (RODRIGUES AA, 2016; KRENZ e KUHN, 2018).

Nesse sentido, Hu *et al.* (2018), ao estudarem deslizamentos na China, indicam que enquanto o MDE convencional de 30m x 30m não é adequado o suficiente para descrever as características topográficas desses eventos, por causa da resolução grosseira, os dados de alta resolução do MDE obtido por VANT são capazes de representar de forma adequada a regularidade espacial do interior da cicatriz do escorregamento.

Isto comprova como o desenvolvimento de técnicas de mensuração, cada vez mais avançadas e de alta resolução espacial e temporal, pode oferecer crescentes oportunidades para que sejam realizadas investigações cada vez mais completas, e discussões com maior perspicácia a respeito das relações entre os fenômenos geomorfológicos, a partir da escala da encosta (HU *et al.*, 2018). Conforme Tarolli (2014) concluiu, compreender os processos da superfície terrestre depende de modernas representações digitais do terreno, e fortemente, da qualidade dos dados topográficos.

Portanto, esta qualidade vem aumentando com o avanço das geotecnologias, que passam a ter um papel importante para o monitoramento, diagnóstico e prática de ações que visem compreender e solucionar questões da geomorfologia e, por conseguinte, da erosão dos solos.

### **3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDOS**

#### **3.1. Caracterização e histórico de uso e ocupação**

A bacia hidrográfica do Alto Rio Pirai (Figura 2), no município de Rio Claro (RJ), possui uma posição estratégica em diferentes questões, como abastecimento de água, geração de energia elétrica, turismo e outras. Isto traz a necessidade de sensata conciliação de seus usos e ocupação. Situada no alto do reverso da Serra do Mar, na região do médio vale do rio Paraíba do Sul, há diversas unidades de conservação nas áreas que a cercam, tanto de uso sustentável quanto de preservação integral (Figura 3). O turismo possui potencial, devido a aspectos naturais e histórico-culturais, por ser elo entre as regiões turísticas da Costa Verde e do Vale do Café. Além de toda uma gama de questões ou preocupações em função da evolução histórica de ocupação e exploração de recursos, desde séculos até os dias atuais.

Fronteiriço e sobreposto aos trechos mais elevados da área de estudo, o Parque Estadual Cunhambebe (PEC), segundo maior do Estado do Rio – o maior é o Parque Estadual dos Três Picos, na Região Serrana – também é caracterizado por separar essas duas importantes regiões administrativas, Costa Verde e Médio Paraíba. Esta sobreposição acontece no município de Rio Claro, que faz fronteira com o Estado de São Paulo, mais a oeste, fato muito importante, pois aproxima o PEC do Parque Nacional da Serra da Bocaina (PNSB). Este possui importância regional, tamanha a preservação de suas terras. Em Rio Claro há, ainda, uma APA Municipal (do Alto Rio Pirai); quatro Reservas Particulares do Patrimônio Natural (as RPPNs), de acordo com o Sistema Informatizado de Monitoria de RPPN do ICMBio (<http://sistemas.icmbio.gov.br/simrppn/publico/rppn/RJ/>, acesso em 04 de fevereiro de 2016); e uma RPPN estadual reconhecida pelo INEA através da Portaria nº 12 de 18 de fevereiro de 2009 ([http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter\\_pres\\_aspres/documents/document/zwff/mda3/~edisp/inea\\_007564.pdf](http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_pres_aspres/documents/document/zwff/mda3/~edisp/inea_007564.pdf), acesso em 04 de fevereiro de 2016). Há outras três RPPNs, sem quaisquer comprovações, exceto pelo Anuário Estatístico do Estado do Rio de Janeiro (2013) da Fundação CEPERJ, para compor o ICMS Ecológico.

Segundo o Plano de Manejo (INEA, 2015), o PEC é capaz de viabilizar a conexão dos mosaicos Bocaina e da Mata Atlântica Central Fluminense. Logo, isto potencializa a consolidação do Corredor Ecológico Tinguá-Bocaina (Figura 3), que se encontra em processo de formação e fortalecimento, buscando ser reconhecido como mosaico.

### Bacia Hidrográfica do Alto rio Pirai - Rio Claro/RJ

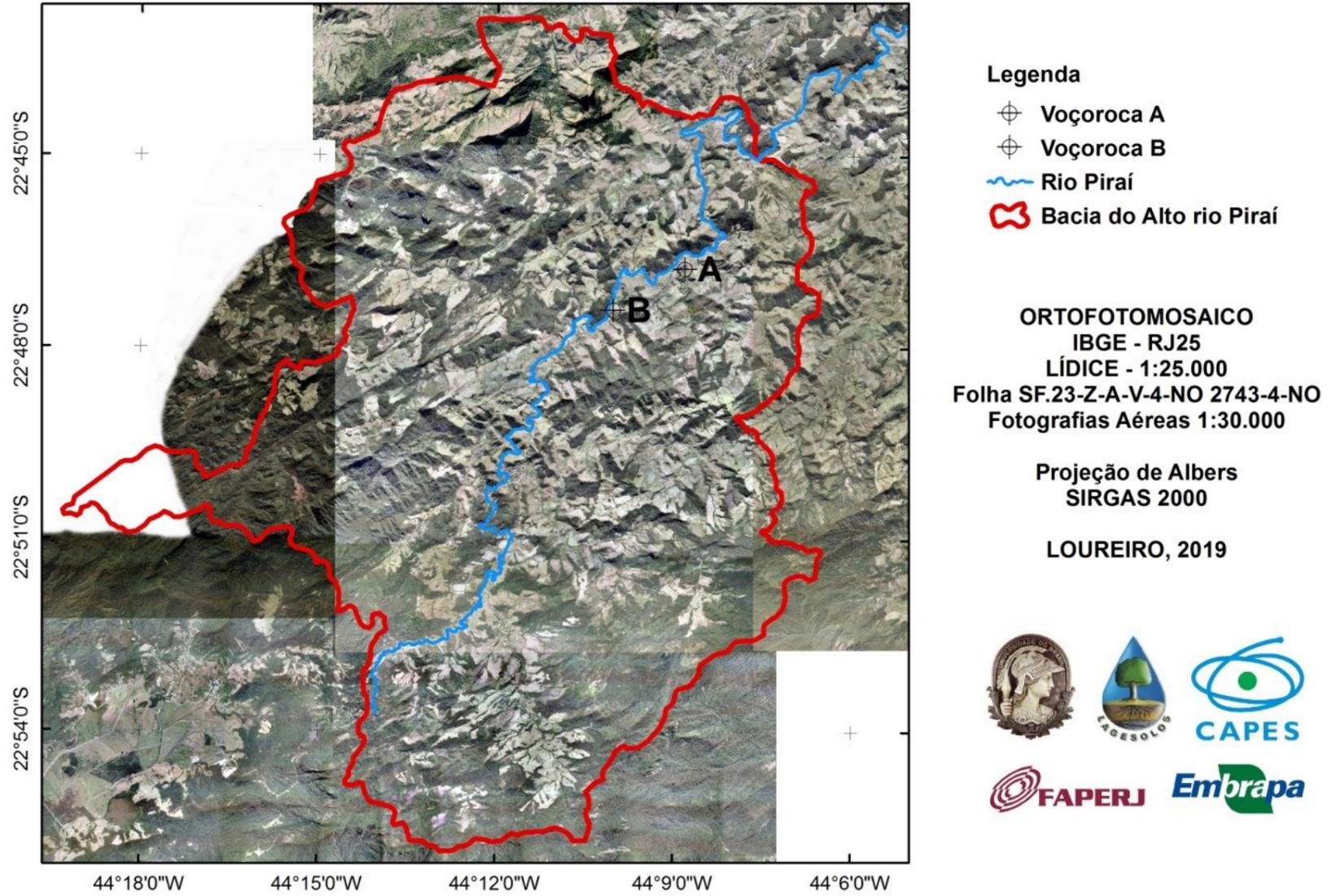


Figura 2 – Delimitação da área de estudo segundo dados de mapeamento do IBGE e do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Guandú.

### Mapa de localização da área de estudos e principais UCs de influência

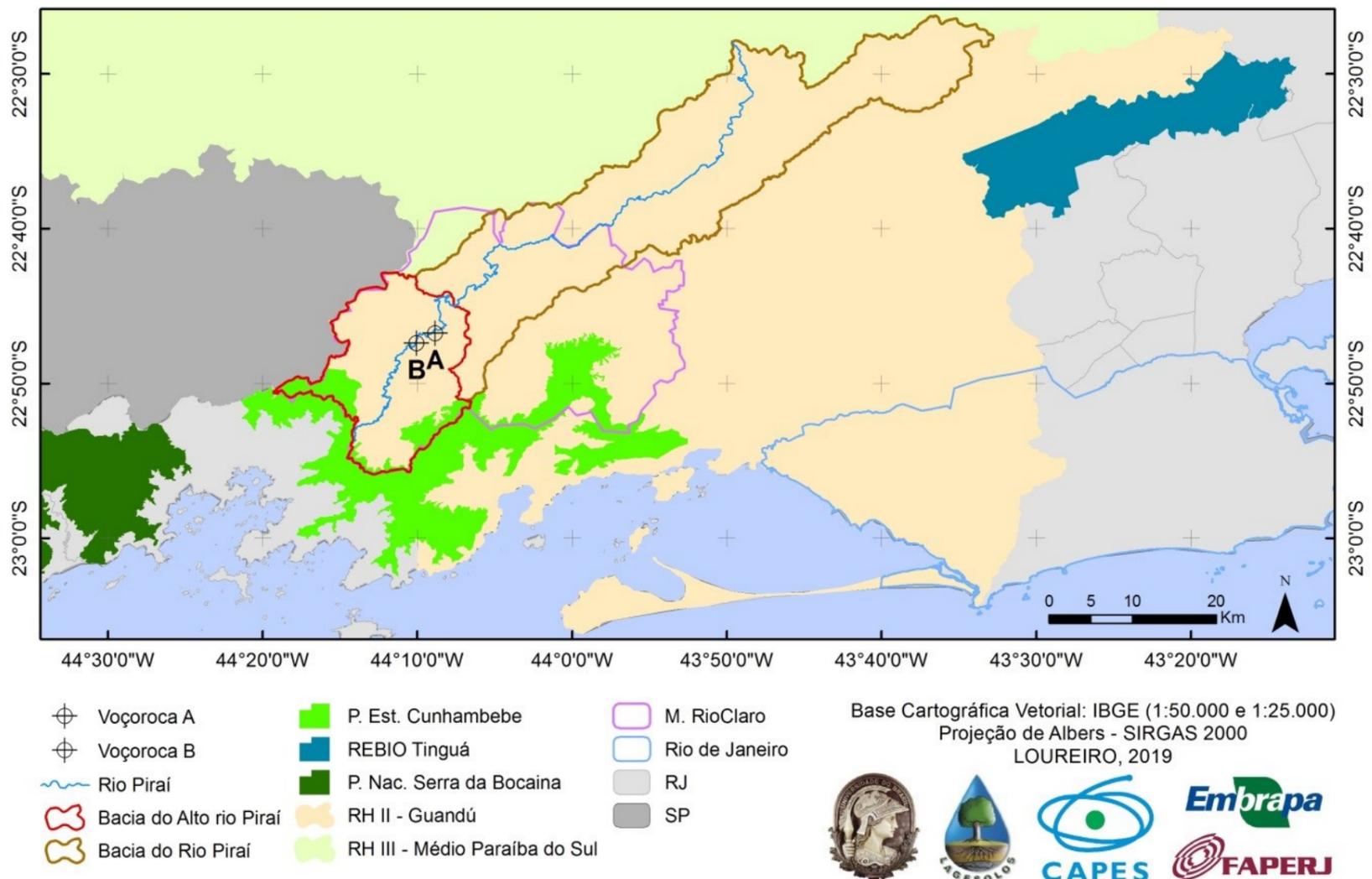


Figura 3) – Bacia do Alto rio Pirai inserida no contexto do Corredor Ecológico Tinguá-Bocaina e das Regiões Hidrográficas Guandu e Médio Paraíba do Sul.

A recuperação de áreas degradadas (figuras 4 e 5) é um dos objetivos do Plano de Manejo para consolidar o Corredor. Através da busca pelo uso de diferentes metodologias de Recuperação de Áreas Degradadas (RAD) e restauração florestal, formando parcerias com universidades, instituições financeiras e organizações da sociedade civil (INEA, 2015).



Figura 4 – Equipe do Lagesolos no interior de voçoroca na Estrada que liga Angra dos Reis à Rio Claro-RJ, em maio de 2015. Foto: Hugo A. S. Loureiro.



Figura 5 – Nesta montagem, de maio de 2016, se vê muito material de solo que foi erodido na área da cabeceira da voçoroca, mas que ainda não foi completamente desagregado e transportado. Fotos: Antonio J. T. Guerra (2016).

Antes da criação do PEC foi elaborado um estudo sobre a criação de duas UCs, no caso o próprio PEC e a APA Alto Piraí, na bacia hidrográfica do rio Piraí, em Rio Claro (INSTITUTO TERRA, 2008). Esta APA, criada pela Lei Municipal nº 385 de 24 de março de 2008, também traz a questão do estabelecimento do Corredor Tinguá-Bocaina, justamente através da criação destas duas UCs. Porém, o estudo citado coloca como principal objetivo da UC, de administração municipal, a proteção das nascentes do rio Piraí, motivada pelo fato de este rio abastecer, artificialmente, a bacia do rio Guandu, através da Represa de Ribeirão das Lajes.

Isto significa que o alto curso do rio Piraí possui extrema importância, pois é parte da alimentação do sistema LIGHT-CEDAE, que abastece de água e energia elétrica por volta de 85% da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Ou seja, todo o conjunto hídrico da bacia do Alto rio Piraí (como os rios Bálsamo, do Saco, da Prata, Parado, das Pedras, dos Coutinhos, do Braço e ribeirão da Várzea) foi adicionado ao sistema da bacia hidrográfica do rio Guandu, por meio de transposição (figura 6), levando a maior parte das águas do rio Piraí, em seu alto curso, para a Represa de Ribeirão das Lajes, através do Túnel de Tócos (COPPETEC, 2006; INSTITUTO TERRA, 2008; LAMEIRA *et al.*, 2010; COELHO *et al.*, 2012; PAIVA e COELHO, 2015; RAMOS *et al.*, 2016; JUNQUEIRA *et al.*, 2017).



Figura 6 – Barragem no rio Piraí, à esquerda, e entrada do Túnel de Tócos, à direita. Fonte: INSTITUTO TERRA, 2008.

Assim, o controle e a recuperação da erosão devem ser pensados como fundamentais, uma vez que seus efeitos são prejudiciais aos corpos hídricos, levando consideráveis aportes de sedimentos até eles, por exemplo.

Na figura 7 é perceptível o grau de atividade de uma das voçorocas do estudo, às margens da RJ-155, Angra dos Reis – Rio Claro. Em 1º de dezembro de 2015 (figura 7a), se vê a saída da feição erosiva, de jusante para montante, com colonização vegetal ao fundo da imagem, indicando certo grau de estabilidade. Em maio de 2016, porém, após registro do total de chuvas no trimestre dezembro-fevereiro de 374,4mm, 537,8mm e 220,6mm, nas três estações mais próximas, respectivamente, UHE Nilo Peçanha (Lídice e Reservatório de Tócos-Barramento) e PCH Rio do Braço-Jusante, a cena do mesmo ponto surpreende. O local foi entulhado pelo material erodido na montante da feição (figura 7b), modificando bastante a configuração anterior. Isto mostra o grau de atividade que a voçoroca possui.



Figura 7 – Visão na saída da voçoroca em dois momentos: (a) dezembro de 2015, com certa estabilidade; (b) maio de 2016, com a feição erosiva bastante alterada. Foto: Hugo A. S. Loureiro.

A grande quantidade de água desviada, do rio Piraí (bacia do rio Paraíba do Sul) para o Ribeirão das Lajes (bacia do rio Guandu), representa mais de 5% do volume total de água

do referido sistema LIGHT-CEDAE, inserindo a área no Comitê de Bacia do Rio Guandu (figura 8), que enquadrou seus mananciais como de classe especial, em seu Plano de Bacia (INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013).



Figura 8 – Sub-bacias da Região Hidrográfica II – Guandu. Do limite com São Paulo, de oeste a norte, as quatro sub-bacias (Alto Pirai, Médio Pirai, Represa Santana e Sacra Família) compõem a delimitação da bacia hidrográfica do rio Pirai. Fonte: Castelo Branco, 2015.

Um dimensionamento da quantidade e do impacto da captação da água nesta área é observado na imagem do Google Earth (figura 9). É notória a “quase morte” do rio Pirai a partir deste ponto, assim seguindo em longo trecho de seu médio curso.

A transposição da água dos rios Pirai e Paraíba do Sul (ocorrida no início do século XX) aumentou a vazão mínima da bacia hidrográfica do rio Guandu de 25 m<sup>3</sup>/s para 120 m<sup>3</sup>/s (SONDOTÉCNICA, 2007 *in* COELHO *et al.*, 2012). Essa vazão é utilizada, primeiro para a produção de energia hidrelétrica e, em seguida, para o abastecimento. Dessa forma, a vazão média é de 43 m<sup>3</sup>/s, quando a vazão outorgada é de 45 m<sup>3</sup>/s, o que caracteriza a ETA

Guandu como a maior estação de tratamento de água em operação no mundo, com certificação no Livro dos Recordes (*Guinness World Records*) de 2008 (CEDAE, 2008 in COELHO *et al.*, 2012).



Figura 9 – Represamento e desvio das águas do rio Pirai para o Sistema Guandu, marcando a divisão entre o alto e médio curso da bacia, com destaque para a drástica redução da vazão a jusante. Fonte: *Google Earth* – aquisição em 10/10/2017.

Ainda sobre a criação da APA Alto Pirai – há dez anos e sem Plano de Manejo até os dias atuais – cabe mencionar algumas especificidades. O núcleo urbano de Lídice, distrito de Rio Claro, foi inserido na APA por decisão política, uma vez que a área, considerada turística, poderia se beneficiar economicamente com a criação da unidade de conservação. Também politicamente, decidiu-se pela não inclusão de determinadas localidades a jusante do alto rio Pirai, para que a gestão da APA não se relacionasse com questões de “produção de gado muito intensa”, ainda que haja importantes fragmentos florestais para a formação de corredores. Assim, delimitou-se a UC a partir de porções mais elevadas das bacias do rio Pirai e do Ribeirão das Lajes, onde áreas agropecuárias, embora existam, não são tão dominantes (INSTITUTO TERRA, 2008).

### 3.1.1. Histórico socioeconômico da área

A ocupação do médio vale do rio Paraíba do Sul foi caracterizada pelos diversos ciclos econômicos ao longo dos séculos: a cana-de-açúcar, no século XVII; o café, do final do século XVIII e durante o século XIX, conferindo o maior impulso na ocupação da área; e a indústria, no século XX. Atividades sempre realizadas de modo predatório, responsáveis pelo estado de degradação verificado hoje em seu meio ambiente (AVELAR e COELHO NETTO, 1992; INSTITUTO TERRA, 2008; SATO *et al.*, 2009; SILVA, 2013; DANTAS e COELHO NETTO, 2018).

A ideia de ser uma área estratégica é corroborada pela boa infraestrutura de transportes, herdada apesar do declínio da cultura cafeeira, a privilegiada posição geográfica, a disponibilidade de recursos hídricos, a obtenção de energia elétrica com facilidade (INSTITUTO TERRA, 2008; SILVA, 2013). Historicamente, a região consiste na principal via de ligação Rio-São Paulo, atravessada longitudinalmente pela Rodovia Presidente Dutra, a Via Dutra. Infraestrutura e proximidade dos maiores centros consumidores do país, que levaram ao desenvolvimento de núcleos urbano-industriais importantes no médio Paraíba do Sul (DANTAS *et al.*, 2005; DEVIDE, 2013). Hoje, os municípios de Barra do Piraí, Barra Mansa, Pinheiral, Porto Real, Quatis, Resende, Rio Claro, Rio das Flores, Valença e Volta Redonda compõem a região administrativa do Médio Paraíba.

A degradação do médio vale do rio Paraíba tem início no século XIX com a devastação de “praticamente toda” a Mata Atlântica em prol das extensas plantações de café (AVELAR e COELHO NETTO, 1992; DANTAS *et al.*, 2005; SATO *et al.*, 2009; DEVIDE, 2013; SILVA, 2013; DANTAS e COELHO NETTO, 2018). Dantas *et al.* (2005) conferem uma dimensão alarmante, mas não alarmista, do cenário regional, com destaque para os processos erosivos, tema desta tese, conforme destacado a seguir:

“A economia agroexportadora da aristocracia escravocrata do século XIX exauriu as potencialidades naturais da região, devido ao dramático esgotamento dos solos e à acelerada erosão das vertentes, atreladas ao desequilíbrio da dinâmica climática e hidrológica regional. (...) O desastre ambiental praticado no Médio Paraíba é de tal magnitude que, até os dias atuais, boa parte da região encontra-se estagnada, marcada por um cenário de pastagens subaproveitadas. Apenas no Noroeste Fluminense, pode-se vislumbrar um cenário de tamanha degradação ambiental em escala regional” (DANTAS *et al.*, 2005, p. 15-16).

Já o município de Rio Claro, onde se insere a bacia do Alto rio Piraí, teve seu processo de ocupação iniciado a partir dos caminhos de ligação de Angra dos Reis com o vale do rio Paraíba do Sul, São Paulo e Minas Gerais. Considerando que parte das águas de Rio Claro são drenadas para a Baía de Sepetiba e parte para o Vale do Paraíba do Sul, e que há forte ligação das atividades desenvolvidas na área com as atividades da região da Costa Verde, é compreensível que este município possua diversas influências (INSTITUTO TERRA, 2008).

Hoje o município possui cinco distritos: Rio Claro (sede), Lídice, Passa Três, Getulândia e São João Marcos. Apenas o segundo está inserido na bacia do Alto rio Piraí. A pecuária hoje praticada em toda a bacia do rio Piraí foi introduzida com a produção leiteira, substituindo o café, após o estabelecimento da crise econômica na região, após a abolição da escravatura e o conseqüente empobrecimento e a perda de prestígio da elite rural escravista (INSTITUTO TERRA, 2008; JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

O tráfego ferroviário foi o responsável pelo crescimento urbano do município, na primeira metade do século XX, através do ramal da antiga Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) Angra dos Reis – Barra Mansa. Cruzando o município de norte a sul, fazia o transporte de matérias-primas e produtos, sendo Rio Claro, Lídice e Getulândia as estações de passagem. Atualmente as rodovias que dão acesso são: a RJ-139 (para Piraí), conectada com a RJ-145 no distrito de Passa Três; a RJ-149, que liga à Mangaratiba, ao sul, passando pelo distrito de São João Marcos; e a RJ-155 (Rod. Saturnino Braga), ligando os distritos de Rio Claro e Lídice à Angra dos Reis, sendo paralela à linha férrea em longos trechos, ainda que, muitas vezes, em lados opostos do canal do rio Piraí (INSTITUTO TERRA, 2008).

A economia do município está baseada no gado de corte, em expansão. O setor primário é muito importante em Rio Claro, sendo o segundo maior empregador. O maior é o setor terciário, enquanto o secundário é incipiente (INSTITUTO TERRA, 2008). Um importante instrumento de gestão na atualidade, o Cadastro Ambiental Rural (CAR) cadastrou 70.612,16 hectares distribuídos em 545 imóveis rurais em Rio Claro (SICAR, 2018).

O turismo é um setor com potencial, devido aos atrativos naturais para turismo de aventura, com prática de *rafting*, por exemplo, e atrativos históricos ligados à Costa Verde e o Médio Vale do Paraíba. São atrativos naturais: as quedas d'água do rio Claro, com quase 130 metros em três saltos; cachoeira do rio Piraí, com corredeiras; cachoeiras de Laje e da

Cascata, mais frequentadas; Pedra de Santa Terezinha; Pedra do Bispo; Pedra do Descanso, na Trilha da Independência; e Pedra do Rastro; sendo estas “pedras” para apreciação da paisagem e escalada. Os atrativos culturais são: os túneis esculpidos em pedra da RJ-155, na Serra do Sinfrônio; a Capela de São Joaquim da Grama, de 1887; a Igreja de Nossa Senhora da Piedade, com construção iniciada no fim do século XVIII; a Trilha da Independência, toda em pedra, construída por escravos em 1728, para encurtar o caminho entre Minas Gerais e o porto de Angra dos Reis (para a Europa); a Hospedaria de Antônio Padre, em São João Marcos; a Casa da Fazenda Morro Alegre; e as Fazendas de São Joaquim da Grama, em Passa Três, e de Sant’ana, em Lídice (INSTITUTO TERRA, 2008).

### **3.2. Clima**

O Médio Vale do rio Paraíba do Sul, a medida que se aproxima do reverso da Serra do Mar e dos alinhamentos serranos escalonados da Serra da Mantiqueira, apresenta um clima úmido, com totais anuais de pluviosidade entre 1.200 e 1.800 mm (AVELAR e COELHO NETTO, 1992; DANTAS *et al.*, 2005; UAGODA *et al.*, 2006; SATO *et al.*, 2009).

O plano de manejo do PEC indica o tipo climático da área de estudo como tropical de altitude, que apresenta invernos brandos e verões chuvosos, típico da região serrana. Com alguma influência do efeito orográfico, chove mais de outubro a abril, com as estações de Lídice e da Barragem de Tócos (ambas no município de Rio Claro) registrando médias anuais de precipitação de 1.786 e 1.507 mm, respectivamente (COSTA *et al.*, 2012; INEA, 2015).

Ainda que com tais médias anuais, no período seco, bem definido entre maio e setembro, a precipitação não ultrapassa os 100 mm de média mensal, de acordo com a normal climatológica para o período de 1960 a 1991. Estes dados apontam médias mensais de mais de 250 mm a 100 mm, respectivamente entre janeiro e abril, na estação da Barragem de Tócos, e de mais de 300 mm a mais de 100 mm, no mesmo período, na estação de Lídice (INSTITUTO TERRA, 2008; COSTA *et al.*, 2012).

Como comparação, o gradiente existente entre as áreas da bacia do Alto rio Pirai, no reverso da Serra do Mar e do Vale do Paraíba, em Pirai, ajuda a explicar o declínio da quantidade total de chuva à medida que se direciona ao interior. Na estação de Pirai,

instalada neste município, o total anual de pluviosidade chega a apenas 1.322 mm, com período seco entre abril e outubro (dois meses a mais que no alto da serra), apresentando índices em torno de 100 mm (INSTITUTO TERRA, 2008; COSTA *et al.*, 2012; DEVIDE, 2013).

### **3.3. Geologia**

O Estado do Rio de Janeiro está, em termos geotectônicos, contido na província estrutural Mantiqueira, definida por Almeida *et al.* (1981 *in* SILVA e CUNHA, 2001), sendo a mais complexa afetada pelo Ciclo Orogênico neoproterozóico/cambriano, o conhecido Brasileiro, no continente sulamericano. O Estado localiza-se, também, na porção interna da “Faixa” Ribeira (SILVA e CUNHA, 2001; UAGODA *et al.*, 2006; BARBOSA, 2009).

Estes autores (*op. cit.*) colocam, ainda, que “todos os domínios sofreram efeitos das orogêneses neoproterozóicas”, o que inclui o Domínio Juiz de Fora/Paraíba do Sul, onde está a área de estudo. Essas orogenias são “caracterizadas pelo metamorfismo e fusão parcial das rochas supracrustais e infracrustais, pela deformação contracional de baixo e alto ângulo, seguida de cisalhamento transcorrente de expressão regional, e pela colocação de diversos corpos granitoides de dimensões muito variadas” (SILVA e CUNHA, 2001; MORAES, 2009).

O reverso da Serra do Mar, na área de estudo, tem como característica do embasamento geológico a ocorrência de rochas pré-cambrianas (gnaisses e migmatitos, que podem ser metassedimentares e plutônicos), associados a intrusões graníticas originadas no ciclo Brasileiro. Estas rochas apresentam distintos graus de resistência frente ao intemperismo, devido à quantidade de biotita e feldspato que as compõem, que são menos resistentes, e de quartzo, mais resistente, o que gera erosão diferencial do relevo. Seus sedimentos são mineralogicamente pobres, podendo originar solos de baixa fertilidade natural e, de certo modo, pobres em nutrientes (UAGODA *et al.*, 2006; INSTITUTO TERRA, 2008).

Há o predomínio dos Gnaisses, principalmente no maciço rochoso que divide as regiões oceânica e interiorana. Também ocorre em várias áreas da bacia do rio Pirai, incluindo suas áreas mais baixas (AVELAR e COELHO NETTO, 1992; INSTITUTO TERRA, 2008).

O contexto geológico do alto curso da bacia hidrográfica do rio Pirai, de acordo com o mapa geológico (figura 10), é composto, principalmente, por estruturas da Suíte Quirino ( $P\gamma_{1q}$ , do Paleoproterozóico); do Complexo Paraíba do Sul (CPS), especificamente, Unidade São Fidélis (MNps, do meso/neoproterozóico); e da Suíte Ilha Grande ( $N\gamma_{2i}$ , do episódio orogênico Brasileiro III).

### Mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Pirai

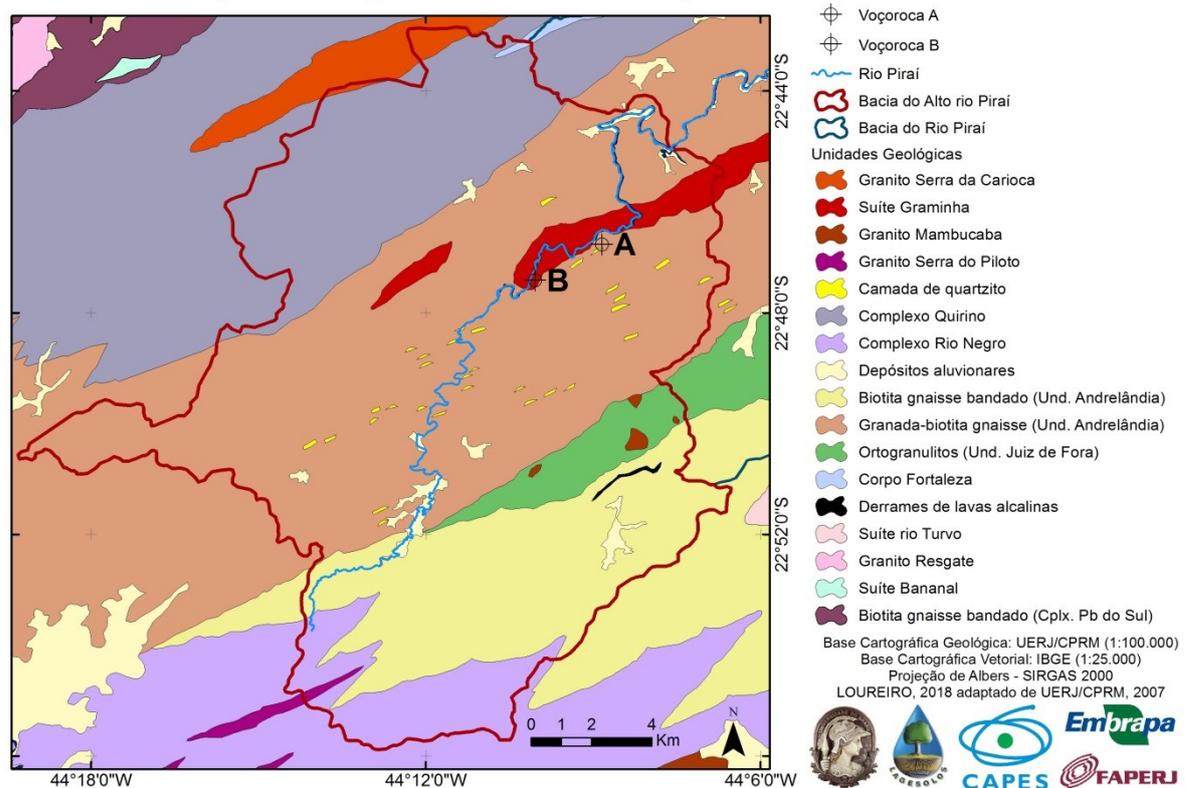


Figura 10 – Mapa geológico da área de estudos (LOUREIRO, 2018 adaptado de UERJ/CPRM, 2007).

Descrita por Machado (1984 *in* SILVA e CUNHA, 2001), a Suíte Quirino é mapeada na porção oriental da folha Volta Redonda, em escala 1:250.000), delimitada pelas zonas de cisalhamento Paraíba do Sul e Valença (Rio Preto). Há uma extensa faixa de orientação geral NE-SW onde afloram gnaisses correlatos, no limite nordeste da mesma folha até a proximidade com Getulândia, distrito de Rio Claro (RJ), no centro da folha (SILVA e CUNHA, 2001).

Nesta unidade, os ortognaisses possuem estruturas internas variáveis, de espesso bandamento gnáissico (em escala de centímetros), ou estruturas foliadas com alguma

homogeneidade (MACHADO, 1984 *in* SILVA e CUNHA, 2001). Estes ortognaisses afloram em parte superior da estrutura imbricada na Faixa Ribeira, em associação a metassedimentos do Complexo Paraíba do Sul. Esta estrutura, onde se observam níveis da Unidade Quirino intercalados com o Complexo Paraíba do Sul, é consequência das dobras e falhas do conjunto, conforme se observa na seção 1 da figura 11 (SILVA e CUNHA, 2001; UAGODA *et al.*, 2006; BARBOSA, 2009; MORAES, 2009).

Estão na constituição da unidade Suíte Quirino hornblenda gnaisses, hornblenda-biotita gnaisses e biotita granitoides homogêneos, com ocorrência local de anfibólitos. Além disso, os litótipos apresentam mobilizados félsicos, que dão aos gnaisses um aspecto migmatítico (SILVA e CUNHA, 2001).

O Complexo Paraíba do Sul é “uma unidade estratigráfica que sofreu grandes modificações nas caracterizações estratigráficas, petrográficas e tectônicas” (SILVA e CUNHA, 2001). Vale destacar que, na literatura moderna, esta unidade tende a ser hierarquizada como Grupo, porém, devido a escala com que foi trabalhada por Silva e Cunha (2001), os autores consideraram não ser possível depurar totalmente o complexo nesta representação. A partir disso, definiram duas faixas principais de ocorrência do complexo, sendo a primeira nas regiões ocidental e norte do Rio de Janeiro, de grande continuidade física, indo da divisa com São Paulo ao Espírito Santo, diferenciada nas unidades São Fidélis, Italva e Itaperuna. A segunda faixa, denominada Lumiar – Rio Bonito, na Serra do Mar, com litótipos agrupados na Unidade São Fidélis (SILVA e CUNHA, 2001).

A Unidade São Fidélis é representativa da maior parte da área de ocorrência do Complexo Paraíba do Sul, composta pelos seguintes metassedimentos detríticos: granada-biotita-(sillimanita), gnaisses quartzo-feldspáticos (metagrauvas), com presença generalizada de bolsões e veios de leucossomas graníticos, resultantes de fusão parcial *in situ* e injeções. Paragnaisses quartzo-feldspáticos são predominantemente constituídos de quartzo, feldspato e biotita, com diversas percentagens de granada, sendo de maior distribuição no interior do CPS (AVELAR e COELHO NETTO, 1992; SILVA e CUNHA, 2001).

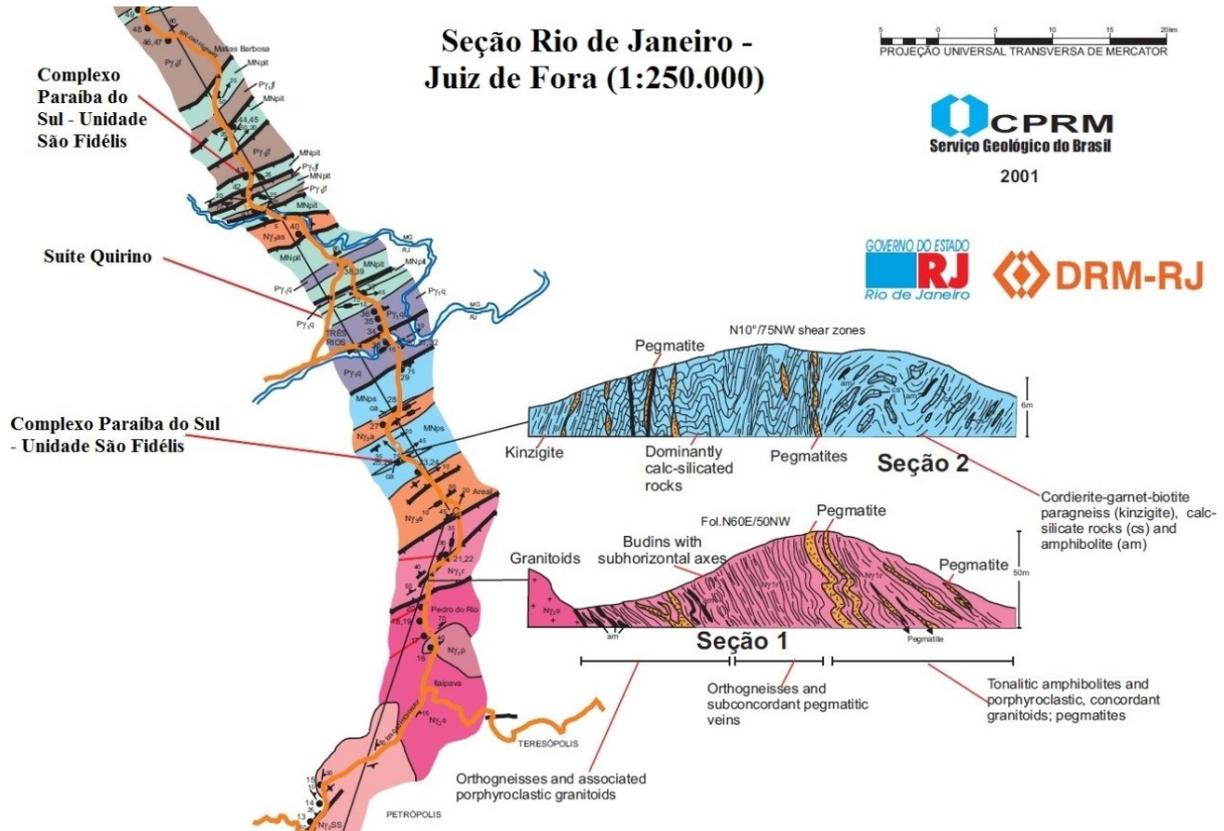


Figura 11 – Seção Rio de Janeiro-Juiz de Fora, destacando as unidades estratigráficas predominantes na área de estudo (adaptado de Silva e Cunha, 2001).

Estruturas sedimentares preservadas caracterizam bandamentos primários, apresentando variadas proporções de argila, areia e carbonatos. A zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul tem predominância de milonitos em estrutura de fluxo bem definida e, geralmente, gnaisses laminados ou bandados, além do quartzo estirado, gerando níveis descontínuos (SILVA e CUNHA, 2001), conforme a seção 2 na figura 11.

Predominam, também, gnaisses aluminosos, com segmentos quebrados pela ocorrência de rochas calcissilicáticas e, ainda mais esparsos, quartzitos e rochas anfíbolíticas. Há, ainda, ao longo das zonas de cisalhamento, a grafita (kinzigíticos), rochas com coloração cinza, granulação fina a média, textura blastomilonítica a milonítica (SILVA e CUNHA, 2001).

Com relação à Suíte Ilha Grande, é válido destacar que suas rochas charnockíticas foram interpretadas como gnaisses granulíticos do embasamento, de origem magmática, ocorrendo no litoral sudoeste do Rio de Janeiro. Quando se observa a estrutura no continente, esta se apresenta como um corpo de 24 km de comprimento e 2 km de largura,

de forma intercalada nos metassedimentos do CPS. As texturas magmáticas destes granitoides são bem preservadas, havendo sobreposição da foliação em estado sólido, de forma paralela ao alongamento NE-SW dos plútons (SILVA e CUNHA, 2001).

### **3.4. Geomorfologia**

O médio-vale do rio Paraíba do Sul, é uma extensa depressão interplanáltica, contornada pelo reverso e pela escarpa das serras do Mar e da Mantiqueira, respectivamente. É característico o típico domínio de mar-de-morros do Vale do Paraíba. (DANTAS *et al.*, 2005; COSTA *et al.*, 2012; DEVIDE, 2013; DANTAS e COELHO NETTO, 2018).

A geomorfologia do PEC, que detém as partes próximas dos divisores das nascentes da bacia do alto rio Pirai, insere o Parque no domínio Escarpas das Serras da Bocaina, Mangaratiba e Mazomba, conjunto de escarpas montanhosas festonadas, fortemente alinhadas em WSW-ENE, compondo as Serras do Mar e da Mantiqueira (Dantas, 2000). Morfoesculturalmente, as Escarpas têm vertentes íngremes, geralmente rochosas e cobertas por depósitos de tálus e colúvios, de gradientes elevados, topos aguçados, ou cristas alinhadas (Rangel, 2016).

De acordo com mapeamento geomorfológico do INEA (2015), predominam na área de estudo os terrenos do Domínio Montanhoso e de Depósitos Coluvionares e Alúvios Associados. As ravinas e voçorocas, feições erosivas lineares aceleradas, enfoque do estudo, concentram-se, principalmente, na unidade geomorfológica Colinas, em morros de vales suspensos e no Domínio Montanhoso (SATO *et al.*, 2009; INEA, 2015).

Em outras palavras, a área de estudo apresenta a macroforma geomorfológica caracterizada pelo escalonamento de falhas normais, com predomínio da direção SW-NE (AVELAR e COELHO NETTO, 1992), a face frontal de maiores declividades e o reverso de gradientes mais suaves, gerando formas marcadamente distintas da escarpa voltada para o Atlântico. Assim, a bacia do Alto rio Pirai, bem como o Alto Ribeirão das Lajes, apresentam compartimentos geomorfológicos diversificados, tendo sub-bacias drenando tanto o reverso do bloco falhado, como, por exemplo, o rio Pirai, o rio Parado e os Córregos Grande, do

Morro e da Água Linda, quanto a escarpa frontal do outro bloco, a exemplo dos rios do Braço, da Prata e Córrego das Pedras (INSTITUTO TERRA, 2008).

Nas bacias do reverso da escarpa ocorrem picos de grande altitude, com afloramentos rochosos no topo, caracterizando os divisores com as bacias litorâneas. A compartimentação do revelo, gerada por uma série de falhas e lineamentos de rochas mais resistentes, confere um gradiente não tão abrupto em direção ao interior. Isto cria níveis de base locais e faz surgir formas planas, a partir de sedimentos de origens coluvial e aluvial, em meio às linhas de serra e picos. Portanto, há uma clara ruptura de declive na transição entre a encosta e o fundo de vale, sendo uma condição favorável a forma de uso e ocupação da área, por plantios e pecuária, por exemplo, mantendo-se a floresta preservada em muitas encostas. Por esta configuração, os rios apresentam tanto trechos turbulentos, com corredeiras e cachoeiras, como porções de características meândricas, acumulando sedimentos arenosos no fundo, e fluxo lento em áreas de deposição (INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013).

Já as bacias da vertente norte, na escarpa do bloco falhado, apresentam características diferentes, assemelhando-se à vertente litorânea atlântica da região. Vales em formato “V”, canais retilíneos com alta energia e sem deposição de sedimentos, maiores desnivelamentos, ausência de formas planas, paredões rochosos e picos com afloramentos. Assim, nestas áreas, o relevo é fator limitante ao uso e ocupação, apresentando uma vegetação melhor preservada que nas bacias do reverso, vertente sul do vale do rio Pirai (INSTITUTO TERRA, 2008).

O mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do Alto rio Pirai elaborado nesta tese de doutorado (figura 12) foi extraído do mapeamento do Estado do Rio de Janeiro realizado por Silva (2002), em escala 1:50.000, seguindo o critério de classificação morfológica por desnivelamento altimétrico e seus significados topográficos (SILVA, 2002 e 2009). As unidades geomorfológicas mapeadas ficam, então, assim definidas:

- Degraus e Serras Escarpadas (superiores a 400 metros) – correspondem às áreas mais elevadas e suas encostas íngremes e mudanças abruptas entre os compartimentos;

- Degraus e Serras Reafeiçoadas e/ou Serras Locais (200 a 400 metros) – junção dos compartimentos de 200 a 300 metros e 300 a 400 metros, que representam elevações isoladas e feições de transição do relevo entre compartimentos diferentes, com altitudes distintas. A drenagem dos compartimentos mais baixos se encaixa progressivamente, fazendo com que o degrau não demonstre fisionomia de escarpa bem definida e íngreme e/ou serras erguidas no interior de domínios colinosos;
  
- Morros (100 a 200 metros) – compartimentos com maior índice de desnivelamento (ombreiras), colinas convexo-côncavas de encostas íngremes, topos convexos e vales encaixados, podendo ocorrer isoladas ou contínuas/transicionais em meio a planícies fluviais;
  
- Colinas (20 a 100 metros) – possuem encostas íngremes, vales e reentrâncias de cabeceiras de drenagem entulhados e estreitos, e topos convexos resultados da litologia de embasamento cristalino em elevado grau de alteração; compreendem também um agrupamento de classes de 20-40m, 40-60m e 60-80m que correspondem a classes de colinas suaves, de topos suavizados gerados do retrabalhamento de materiais sedimentares;
  
- Planícies Fluviais e Flúvio-marinhas (0-20 metros) – são áreas de planícies preenchidas pelos depósitos de sedimentos quaternários de origem fluvial, com feições de topografia plana-horizontal a sub-horizontal.

## Mapa Geomorfológico da Bacia do Alto Rio Pirai

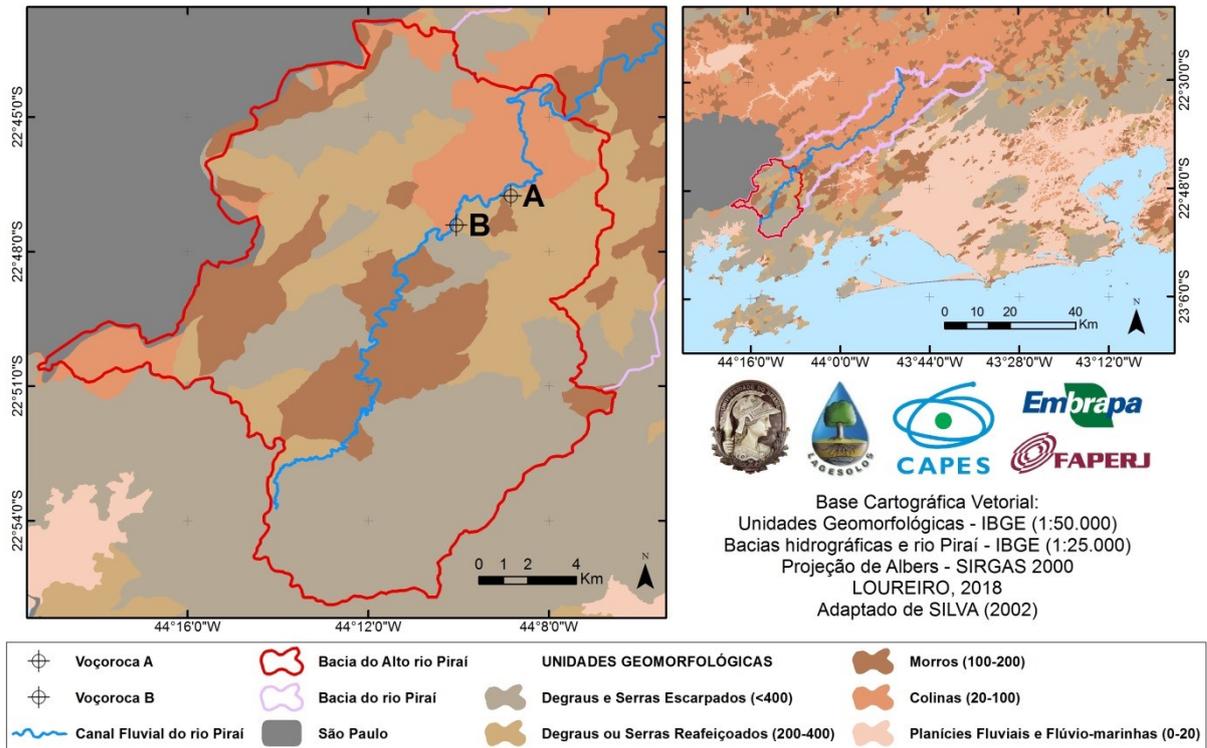


Figura 12 – Mapa com as unidades geomorfológicas presentes na bacia hidrográfica do Alto rio Pirai (LOUREIRO, 2018 *adaptado de* SILVA, 2002).

### 3.5. Solos

Silva e Botelho (2014) destacam o alto potencial para movimentos de massa e eventos erosivos que possuem, de um modo geral, os solos do estado do Rio de Janeiro, devido às características desses solos, do relevo e da distribuição da pluviosidade.

A bacia do Alto rio Pirai, por estar localizada em áreas de menor declividade, características do reverso da serra do Mar, apresenta solos mais espessos, favoráveis, em certa medida, ao uso agropecuário, ao contrário das escarpas oceânicas (INEA, 2015).

A transição entre Neossolos Litólicos (nos divisores) evolui até os Latossolos Vermelho-amarelos (INEA, 2015). De modo geral são dominantes os Cambissolos, ocorrendo em encostas íngremes, frequentemente associados à ocorrência dos, também dominantes, Latossolos vermelho-amarelos, como citado acima, rico em minerais primários, presentes no terço inferior das encostas e fundos de vale (INSTITUTO TERRA, 2008; SATO *et al.*, 2009).

Ainda de acordo com o estudo do Instituto Terra (2008), as porções altas da bacia apresentam Neossolos com características intermediárias da classe dos Cambissolos, como por exemplo, horizonte B incipiente, associados a Neossolos Litólicos na base de afloramentos rochosos. Ocorrem ainda, nos fundos de vale de topografia suave, Neossolos Flúvicos e Planossolos.

A figura 13 apresenta o mapa com das classes de solo na área de estudo, a partir do mapeamento de solo da Embrapa (CARVALHO FILHO *et al.*, 2003). Observa-se a ocorrência predominante de Latossolos Vermelho-Amarelos no centro da bacia, envolvendo largas áreas a partir das margens do canal principal e ampliando sua distribuição à medida que se segue à jusante. Bem como a predominância de Cambissolos em áreas mais elevadas da bacia, circundando os Latossolos. Há presença de afloramentos de rocha ao norte, área da sub-bacia do rio do Braço, e Neossolos Litólicos em áreas próximas dos divisores.

É possível diferenciar a bacia do Alto rio Pirai pelas sub-bacias que drenam a vertente à esquerda do rio principal, orientadas para sul, e as que drenam à direita do rio, para o sentido norte, principalmente. Com maiores declividades na vertente esquerda, predominam Neossolos Litólicos e aqueles Neossolos com horizonte B incipiente, chegando a registrar Latossolos jovens em áreas de divisores e fundos de vale, devido à presença eventual de degraus topográficos. As sub-bacias pela direita, no reverso da escarpa serrana, com menores declividades e níveis de base locais, conferem maiores níveis de pedogênese aos materiais, originando Latossolos bem desenvolvidos, também havendo ocorrência de Espodosolos e solos com características glei. Já nas partes mais baixas da bacia do rio Pirai, de relevo mais colinoso, dominam Latossolos vermelho-amarelos, solos com horizonte B textural e Neossolos Flúvicos em fundos de vale (INSTITUTO TERRA, 2008).

## Mapa de Solos da Bacia do Alto Rio Pirai

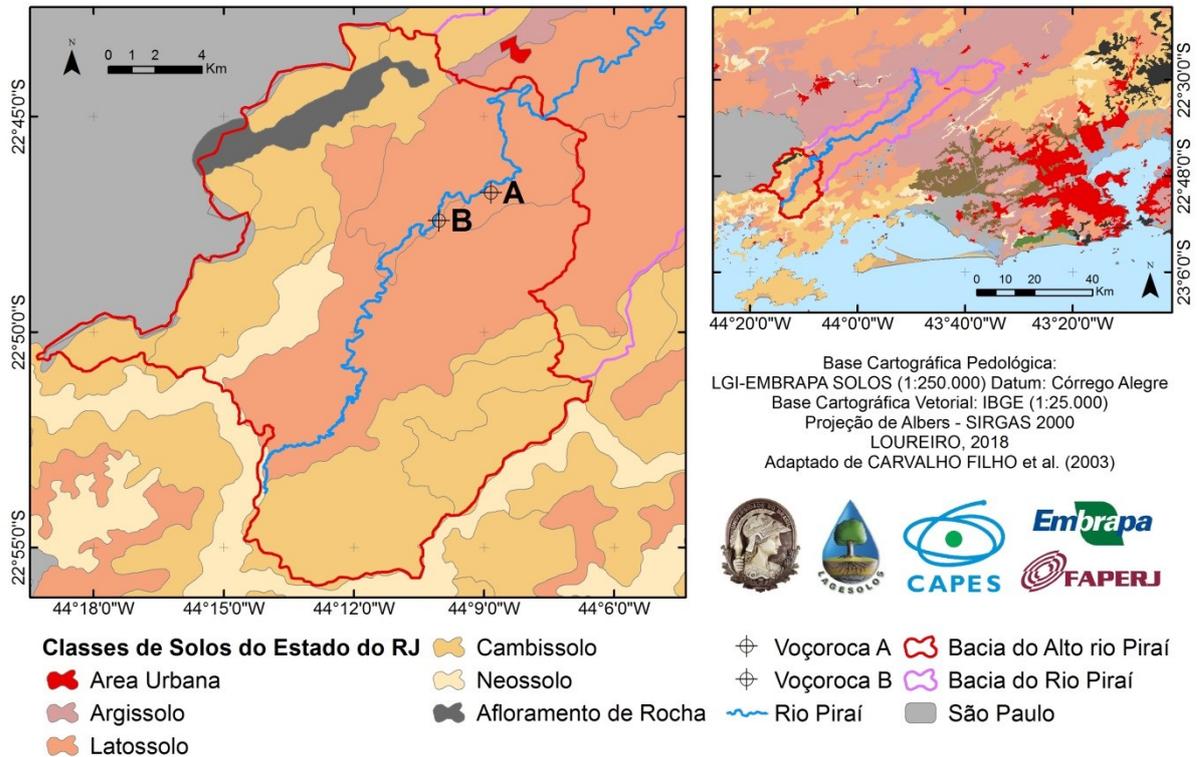


Figura 13 – Mapa de solos, destacando a presença de Latossolos na área de estudos (LOUREIRO, 2018 adaptado de CARVALHO FILHO et al., 2003).

### 3.6. Vegetação

De um modo geral, a paisagem no município de Rio Claro, comum em áreas rurais, possui florestas nas partes superiores das bacias hidrográficas, fragmentos florestais isolados em meio aos terrenos alterados pela ação antrópica, principalmente nos cobertos por gramíneas. Estas matas isoladas são, normalmente, remanescentes situados em colinas, morros ou serras locais, sendo utilizadas para captação de água. Os fragmentos podem ser, ainda, formações secundárias, originadas pelo abandono de áreas de pasto ou agrícolas (UAGODA et al., 2006; INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013).

Originalmente, Rio Claro possuía vegetação caracterizada pela Floresta Estacional Semi-decidual, ou Floresta Tropical Subcaducifólia, típicas de áreas de Mata Atlântica, que possuem período seco bem definido (como citado anteriormente, inverno seco e verão chuvoso). Neste período de escassez de chuvas ocorre a perda de folhas de parte da vegetação. As semidecíduas possuem estrato superior a mais de 20 metros e árvores

emergentes ultrapassando 30 metros. No sub-bosque de áreas com maior umidade há presença comum do Palmito Jussara (*Euterpe edulis*), palmeiras diversas e samambaia açu, além de espécies epífitas, como bromélias e orquídea (INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013).

Diferentemente, nas porções elevadas da bacia do rio Pirai são poucas as formações semidecíduas, sendo as florestas caracterizadas como Ombrófilas Densas (INSTITUTO TERRA, 2008). Estas são como continuações das formações Ombrófilas Densas Montana presentes na vertente oceânica da Serra do Mar, recebendo elevada precipitação, devido a sua posição topográfica. Sem período seco significativo, não apresentam característica de esclerofilia. Por isso, são ainda maiores que as matas semidecíduas, tendo estrato superior entre 25 e 30 metros, com até quatro estratos florestais (INSTITUTO TERRA, 2008; INEA, 2015; RANGEL, 2016).

O topo das serras, por volta de 1.750 metros de altitude, onde a vegetação é bastante conservada, é área decisiva para a conservação, sendo essencial para a ampliação dos fragmentos existentes na área de estudo. Ou seja, tem papéis fundamentais em termos de biodiversidade e de produção de água para o sistema LIGHT-CEDAE. Nas áreas menos íngremes, com acesso mais facilitado, os pastos substituíram as florestas. Assim, os pastos e a agricultura, com pouca expressão, dominam a paisagem em ambientes de colinas e planícies (INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013; DANTAS e COELHO NETTO, 2018).

Há, também, formações florestais em estágios iniciais de sucessão ecológica. Conseqüentemente, estão presentes na área diversos fragmentos florestais de variados tamanhos e graus de conservação. Junto aos divisores são encontrados, normalmente, aqueles fragmentos com maior tamanho e de melhor conservação. Mas os fragmentos estão presentes também em meio aos pastos e às poucas áreas com agricultura, distribuídos tanto nas áreas de floresta ombrófila quanto de formações semidecíduas. Estes fragmentos encontram-se isolados, podendo servir para usos importantes em fazendas, como a preservação de pequenos mananciais ou até mesmo a retirada de madeira (INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013).

No município de Rio Claro os fragmentos se concentram em maior quantidade e expressão nas proximidades de serras e em meio às pastagens nas partes mais altas do

município, como na área de estudo, da bacia do Alto rio Pirai. Também há fragmentos de mata ciliar, embora de tamanho reduzido, ao longo de pequenos riachos. Mas estes fragmentos também sofrem pressões, a partir de algumas ocupações irregulares, lançamento de dejetos in natura, desmatamento e retirada de recursos, plantios e criação de animais, entre outros (INSTITUTO TERRA, 2008; DEVIDE, 2013).

O estudo realizado pelo Instituto Terra (2008) faz uma comparação de dois mapas de vegetação em anos diferentes, 1995 e 2006. Apontam, então, que houve aumento de cobertura florestal, com mata secundária, no extremo nordeste da bacia do Alto rio Pirai neste intervalo de 11 anos. A cobertura dominante no primeiro mapeamento era a gramínea, das áreas de pastagem. Sendo assim, com o abandono de uso como pasto dessas áreas, ocorreu a sucessão ecológica, gerando áreas florestadas em estágio inicial de sucessão, com em torno de 10 anos de idade. Há a tendência de, em se mantendo a sucessão, a área alcance estágios de floresta avançada, uma vez que existem áreas de mata no entorno, colaborando com a manutenção da vegetação (INSTITUTO TERRA, 2008).

Segundo o mesmo estudo (INSTITUTO TERRA, 2008), numa área com delimitação diferente (menor) da considerada nesta Tese, a bacia do Alto rio Pirai possui 65% de cobertura por Florestas Ombrófilas, chegando a 76% de recobrimento florestal quando somadas as áreas de matas secundárias. Consideram ainda que 20% da cobertura seja representada por gramíneas (pastagens), além de possuir maior proporção de áreas com agricultura (4%), em comparação a áreas do entorno.

Na porção mais inferior do alto curso do rio Pirai a configuração ambiental se assemelha a do médio curso do rio Pirai, com o predomínio de pastagens e quase nenhuma agricultura. A principal atividade é, pois, a produção de gado de corte, realizada em grandes fazendas. Indeadidamente, o manejo de algumas dessas áreas é feito com o uso de fogo para limpeza dos pastos, podendo alcançar bordas de matas e fragmentos. Ainda assim, estes fragmentos são encontrados facilmente, distribuídos na paisagem (INSTITUTO TERRA, 2008). Outro exemplo de manejo inadequado do solo é a aração morro abaixo, como na figura 14, prática realizada nestas encostas para o replantio do próprio pasto.



Figura 14 – Encosta durante aração morro abaixo, com trator circulando no reverso da vertente, em grande declividade, na bacia do Alto rio Pirai, em maio de 2016. Foto: LAGESOLOS, 2016.

Já as florestas são predominantes na porção superior, principalmente nos divisores. Contudo, é justamente nesta área mais elevada, na localidade do Alto da Serra, situada na Serra do Sinfrônio, que se encontram as maiores áreas agrícolas da bacia do Alto rio Pirai. Isto se deve, em primeiro lugar, à existência da Comunidade Quilombola do Alto da Serra. Sua atividade produtora ocupa terços superiores das encostas, que ultrapassam os divisores das bacias do rio Pirai, rio Claro e rio Ariró, este último em Angra dos Reis (INSTITUTO TERRA, 2008).

Esta produção tem como principal produto a banana, matéria-prima para doces vendidos em Lídice. Há, ainda, a produção leiteira, fabricando-se queijo para venda em Angra dos Reis, especialmente. Produzem, ainda, milho para consumo da comunidade e das galinhas criadas ali, e feijão, também para consumo da comunidade. Inclusive, para seu consumo, produzem animais, como bois, galinhas e porcos (INSTITUTO TERRA, 2008).

Na sub-bacia do rio do Braço as florestas estão conservadas. Pode-se dizer que é o mais importante afluente do alto curso do rio Pirai, pois drena toda a parte norte da bacia e faz a divisa entre os rios Pirai e Bananal, já no estado de São Paulo. Isto a caracteriza como importante área em termos de biodiversidade e, claro, de recursos hídricos regionais. Dos 7.810 hectares, 77% são recobertos de floresta ombrófila densa e 1,2% é coberto por vegetação secundária. O uso de pastos representa 7,5% da cobertura desta sub-bacia, concentrando as principais fazendas em sua área central (INSTITUTO TERRA, 2008).

É na sub-bacia do rio do Braço que existe a RPPN Sítio Fim da Picada (figura 15). Como forma de prática conservacionista, possui um fragmento florestal próximo ao rio. Enquanto esta RPPN situa-se na parte baixa, já próximo à confluência com o rio Pirai, há outra situada na parte alta, na divisa com São Paulo, conservando mata ciliar. Há, ainda, nesta sub-bacia duas Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), a da Fazenda Santana e a do Braço.



Figura 15 – Na RJ-155, em direção à Lídice, placa de atrativo turístico indica a RPPN *Sítio Fim da Picada*. Acesso por estrada de terra logo após a placa. Foto: Hugo Alves S. Loureiro, 2015.

Outra sub-bacia, de grande destaque no Alto rio Pirai é a bacia do rio das Pedras, localizada próxima a nascente do rio Pirai e do distrito de Lídice. A sub-bacia é a área piloto do pioneiro Programa de Pagamento de Serviços Ambientais (PSA), criado pelo ITPA com a

Prefeitura de Rio Claro e apoio financeiro do Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Guandu (CBH-Guandu), chamado **Produtores de Águas e Florestas** (PAIVA e COELHO, 2015; RAMOS *et al.*, 2016; JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

Nesta bacia do rio das Pedras verifica-se a maioria das áreas de agricultura da bacia do Alto rio Piraí, não somente pela produção da comunidade Quilombola Alto da Serra, anteriormente citada, como pela presença de outros produtores rurais nesta área. São produzidos leite, hortaliças e banana, para venda e milho, feijão e mandioca para subsistência. Há até mesmo uma das granjas de frangos Rica, responsável pela contratação de bom percentual de mão-de-obra ([www.microbacias.rj.gov.br/pt/microbacia/rio-das-pedras#sthash.b4P2Z6VM.dpuf](http://www.microbacias.rj.gov.br/pt/microbacia/rio-das-pedras#sthash.b4P2Z6VM.dpuf)).

### **3.6.1. Produtores de Águas e Florestas – Pioneirismo de PSA no Rio de Janeiro**

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) é um instrumento de política pública no modelo conservador-recebedor (inverso do princípio poluidor-pagador), por meio do qual paga-se pelos serviços ambientais prestados de forma voluntária por proprietários rurais, como, por exemplo, a preservação e recuperação de nascentes e áreas florestadas, respectivamente (PAIVA e COELHO, 2015; RAMOS *et al.*, 2016; JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Estes últimos autores (op cit) afirmam que está em tramitação o Projeto de Lei nº 792/2007, na Câmara dos Deputados, para o estabelecimento de normas mínimas a serem cumpridas nos PSA. Mas que, apesar de não haver regulação nacional, diversos estados contam com legislação própria sobre o tema, incluindo o Rio de Janeiro (Lei 5.100 de outubro de 2007 – conhecida como ICMS Verde).

O *Produtores de Águas e Floresta* é um programa de PSA da Prefeitura de Rio Claro, pioneiro no Estado do Rio de Janeiro. Sua finalidade é o pagamento, a proprietários e produtores rurais, pelo serviço ambiental de preservação das nascentes do rio Piraí, dada sua importância estratégica no abastecimento de milhões de pessoas na cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana (RMRJ). Tal serviço consiste na conservação de áreas de floresta nas propriedades e a disponibilização de outras áreas para reflorestamento. Para, assim, aumentar a cobertura florestal em áreas de preservação permanente (APP) e outras

áreas prioritárias, visando à melhoria de qualidade e quantidade dos recursos hídricos (PAIVA e COELHO, 2015; RAMOS *et al.*, 2016; JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

A escolha da bacia do Alto rio Pirai se deve pelo fato dela ser responsável por 15% dos recursos hídricos do Sistema Guandu, que corresponde a 80% do abastecimento da RMRJ, pela CEDAE, além de 25% da geração de energia, pela LIGHT (PAIVA e COELHO, 2015; RAMOS *et al.*, 2016; JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

Foi necessária, inicialmente, uma área piloto para a implantação do projeto PAF, sendo escolhida a sub-bacia do rio das Pedras, em Lídice. Foram obedecidos três critérios técnicos: (1) relevância em termos de produção e fornecimento de água; (2) importância para a biodiversidade; e (3) forças institucionais presentes nos territórios (VILLAR *et al.*, 2012 *in* JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Portanto, a posição à montante, a integração com o Corredor de Biodiversidade Tinguá-Bocaina e o interesse da Prefeitura Municipal de Rio Claro (PMRC) e da ONG *Instituto Terra de Preservação Ambiental* (ITPA) no desenvolvimento do PAF, contando com a parceria e financiamento da *The Nature Conservancy* (TNC), levaram à escolha de tal área (JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

Segundo o estudo de Paiva e Coelho (2015), realizado com financiamento da agência de bacia do rio Paraíba do Sul, a AGEVAP, a maior parte dos produtores que voluntariamente aderiram ao PAF já adotavam práticas conservacionistas anteriormente ao projeto. Porém, de acordo com tais produtores, os valores recebidos não são satisfatórios, levando ao não estímulo para que haja novos participantes no PAF.

Porém, as metas estipuladas para “restauração e conservação” [no caso, recuperação ou reabilitação, ao invés de restauração] de áreas foram ultrapassadas (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Ainda que os estudos de Ramos *et al.* (2016) coloquem em dúvida a questão da compreensão do objetivo comum por parte dos proprietários rurais (conservação e produção de água através da preservação e recuperação de florestas). Apontam, também, o risco de comprometimento de negociações da unidade gestora do PAF, sem a existência de um espaço para diálogo que possa reunir proprietários rurais, sociedade civil organizada e o poder público. Se por um lado, o PAF passou por ampliação, estendendo-se para todo o município, por outro, a continuidade das ações do projeto é frágil (RAMOS *et al.*, 2016).

Dados atualizados indicam que, durante os 10 anos de desenvolvimento do PAF, já foram beneficiados 62 proprietários rurais, com a proteção de mais de 4.000 hectares e a restauração florestal de outros 500 hectares. Os recursos utilizados para o PSA são oriundos do ICMS Verde do Município, cujo valor é o maior do Estado, adquiridos através da outorga do uso da água, gerenciada pelo CBH-Guandu (CASTELO BRANCO, 2015; PAIVA e COELHO, 2015; RAMOS *et al.*, 2016).

Para a experiência do PAF foi assinado o Termo de Cooperação Técnica, envolvendo a Secretaria Estadual do Ambiente (SEA) e o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), a Prefeitura de Rio Claro, a TNC, o CBH-Guandu e o ITPA, sendo este definido como Unidade Gestora do Projeto (UGP), além do apoio da ANA (CASTELO BRANCO, 2015; PAIVA e COELHO, 2015; RAMOS *et al.*, 2016). O valor mínimo estabelecido pela UGP a ser recebido pelos proprietários, a partir da comprovação hectare/ano dos serviços prestados, foi de R\$ 100,00 ao ano (PAIVA e COELHO, 2015).

Chama a atenção, de acordo com Ramos *et al.* (2016), a importante atuação do ITPA enquanto disseminador de informações junto aos participantes do PAF. Embora o contrato desta ONG com a Prefeitura tenha acabado em 2014, ainda é bastante atuante, uma vez que possui sede na bacia do rio das Pedras e já exerce atividades na região há alguns anos. Os autores (*op. cit.*) indicam que a TECNOGEO – atual gestora, vencedora da licitação da AGEVAP para gerir o repasse de recursos aos proprietários, a partir de 2014 – parece não ter tido tempo hábil (apesar de passados dois anos do início do contrato à época) para estabelecer relações com os proprietários rurais, muitos dos quais sequer a conhecem.

Portanto, a bacia hidrográfica do Alto rio Pirai, bem como o município de Rio Claro, são áreas com importância direta e indireta em vários aspectos. Suas condições de preservação e degradação, além de toda dinâmica político-ambiental e de participação de ONGs colocam a região como pertinente a estudos de diferentes temas: Unidades de Conservação, transportes, Vale do Café, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, Sistema Guandu, Comitê de Bacias Hidrográficas e, claro, erosão dos solos, entre outros.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. ESCALAS DE ANÁLISE E RECORTE ESPACIAL PARA ESTUDO**

É possível monitorar, analisar e compreender a erosão dos solos a partir de diferentes escalas, e a bacia hidrográfica é uma delas (GUERRA e MENDONÇA, 2007; CORREIO e BARP, 2014; MOMM-SCHULT *et al.*, 2014; GARCÍA-RUIZ, 2015; ALBUQUERQUE e SOUZA, 2016). Peixoto *et al.* (1997) apontam o uso desta unidade, fundamental para análise e planejamento ambiental, com componentes físicos e bióticos (relevo, solo, vegetação, etc.) considerados de maneira igual e integrando aspectos sociais, econômicos e políticos na área da bacia (CORREIO e BARP, 2014; ALBUQUERQUE e SOUZA, 2016). Nesse sentido, pode-se vincular a importância ambiental da conservação da bacia do Alto rio Pirai com a importância estratégica que esta possui em relação a regiões fora dela, como as questões das transposições ao Paraíba do Sul e Guandu e o fornecimento de água para consumo e geração de energia elétrica, através do Ribeirão das Lajes, na bacia do Guandu.

Ouyang *et al.* (2018) afirmam que características da paisagem nas bacias hidrográficas podem explicar de 65% a 74% das mudanças na erosão do solo e no aporte de sedimentos, devendo ser prioritário planejar corretamente o uso da terra para reduzir os processos de erosão. Assim, efeitos das propriedades do solo sobre a erosão, ainda que em longo prazo, constitui importante tópico para o manejo ambiental (OUYANG *et al.*, 2018).

Garcia-Ruiz *et al.* (2015) exemplificam, em se tratando das diferentes escalas espaciais dos processos erosivos, que erosão laminar e por ravinas são estudadas predominantemente na escala das parcelas de erosão, enquanto voçorocas, dada sua grande produção de sedimentos, são estudadas em pequenas e médias bacias hidrográficas.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto, segundo Aber *et al.* (2010), tornou-se uma escolha óbvia de monitoramento da erosão por voçorocas, ao permitir cobertura rápida e espacialmente contínua da área degradada. Apesar disso, os autores questionam a respeito da incapacidade de precisão das imagens convencionais em relação às dinâmicas da erosão e suas variabilidades espaciais e temporais em curto prazo. Porém, conforme afirmam Preti *et al.* (2013), instrumentos de LiDAR como o *Laser Scanner* Terrestre têm sido ferramentas

úteis para levantamentos de campo detalhados, em escala de encosta, do mesmo modo que é possível acrescentar o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para este fim.

Dessa forma, a pesquisa realizada adotou como recorte espacial a bacia hidrográfica do Alto rio Pirai. Sua delimitação seguiu como critérios a hipsometria; características morfológicas da hidrografia da área, ambos conforme Soares e Souza (2012), como encaixe dos rios nos vales, meandros e desníveis; e delimitações anteriores, apresentadas em diversos mapas de Castelo Branco (2015) e do Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Guandu, inclusive tratando sobre a APA do Alto rio Pirai.

A partir dessa definição espacial, as análises para diagnóstico comportaram o trabalho em diferentes escalas, desde aquelas que extrapolam os limites da bacia, passando pela escala do recorte adotado da bacia, pela escala da encosta, até chegar à escala do processo e das propriedades do solo. Entende-se, pois, que a análise ambiental em geomorfologia passa por essa troca de escalas, por esse trânsito entre as diferentes escalas, conforme os objetivos de cada pesquisa.

#### **4.2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E DE BASES CARTOGRÁFICAS**

O levantamento da bibliografia pertinente à pesquisa foi realizado por diferentes meios, compreendendo capítulos de livros, trabalhos técnicos, monografias, dissertações, teses, artigos em periódicos nacionais e internacionais. Para isso foram acessadas: a Biblioteca do PPGG (Biblioteca Professor Maurício de Almeida Abreu do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFRJ); a Biblioteca do LAGESOLOS (Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação dos Solos); o Portal de Periódicos CAPES, plataforma digital com acesso aberto para universidades e pós-graduandos a milhões de artigos científicos; a plataforma ou “rede social científica” *Research Gate*, onde pesquisadores de todo o mundo, e níveis de formação, disponibilizam seus estudos à comunidade acadêmica e científica; e até mesmo o buscador *Google* e sua variável *Google Acadêmico*.

As bases cartográficas geoespaciais utilizadas para os mapeamentos temáticos elaborados para a tese foram obtidas através do site do IBGE que as disponibiliza, o IBGE

Mapas <<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais>>. Ao clicar em “bases cartográficas” há um diretório com variadas pastas do arquivo do IBGE. A partir dele foram feitos *downloads* de *shapefiles* do Estado do Rio de Janeiro em escala 1:25.000. Há, atualmente, as pastas “versao2016/” e “versao2018/”. Uma vez que as bases foram obtidas em 2017, o material utilizado diz respeito à pasta “versao2016”. Assim, foram obtidos os arquivos em formato *shape* referentes à hidrografia, limites municipais, e de relevo (curvas de nível e pontos cotados da altimetria). Foi feito, também, *download* da Nota Técnica sobre a “Base Cartográfica Vetorial Contínua do Estado do Rio de Janeiro na Escala 1:25.000”.

Para delimitar a bacia hidrográfica do Alto rio Piraí, foi preciso obter o *shapefile* com as bacias hidrográficas das Regiões Hidrográficas (RHs) do Paraíba do Sul e do Guandu. Estas estão disponíveis através da Base Temática “O Estado do Ambiente” do INEA (Instituto Estadual do Ambiente), órgão do Governo do Estado do Rio de Janeiro (acesso em <<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/EstudosePublicacoes/EstadodoAmbiente/index.htm&lang>>>).

Ainda sobre o levantamento das bases cartográficas, foi obtido junto ao GeoCart (Laboratório de Cartografia da UFRJ), coordenado pelos professores doutores Paulo Márcio Leal de Menezes e Manoel do Couto Fernandes, *shapefile* com a Projeção de Albers, para reprojetar todo o material do IBGE e do INEA para esta projeção cartográfica métrica, cujo uso impede problemas cartográficos com relação aos fusos.

Adiante são especificadas as imagens disponíveis utilizadas nesta tese, bem como os caminhos seguidos para sua obtenção.

#### **4.2.1. Imagens disponíveis e utilizadas: caminhos para obtenção**

Além da base cartográfica vetorial, foi importante para esta pesquisa o uso de Ortomosaicos, também de escala 1:25.000, disponibilizados pelo IBGE. Na página do IBGE Mapas deve-se clicar em “arquivos *raster*”, onde as ortofotos compõem Ortomosaicos, com *layout*, em formato PDF (figura 16) e sem *layout*, em formato TIF (acesso em “cartas imagem” e “ortomosaicos”, respectivamente).

O Ortomosaico que corresponde à maior parte da bacia do Alto rio Pirai, sobretudo às áreas visitadas nos trabalhos de campo, com coletas de amostras e registro de pontos com erosão, é a Carta Imagem de Lídice. Na articulação das folhas, o Ortomosaico de Lídice corresponde à Folha SF 23-Z-A-V-4-NO 2743-4-NO.

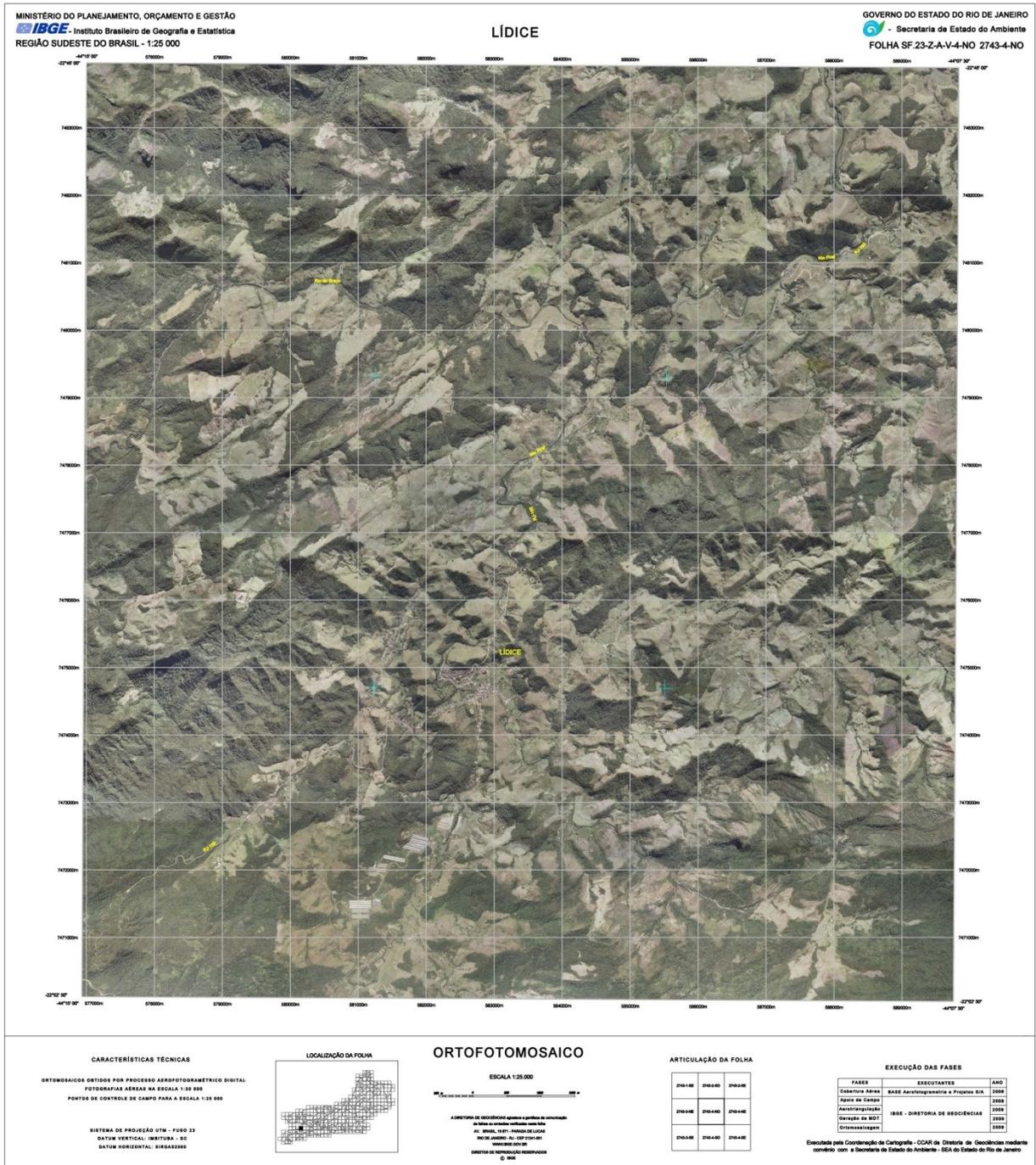


Figura 16 – Reprodução da Carta Imagem do Ortomosaico de Lídice, produzido pelo IBGE.

A Carta do Ortomosaico traz no seu canto inferior direito um quadro com as fases executadas para chegar ao produto final. São cinco etapas, desde a tomada aérea das ortofotos (1:30.000), passando por checagens em campo (1:25.000), aerotriangulação e geração de modelo digital do terreno, até a ortomosaicagem, ou seja, a junção das ortofotos em um Ortofotomosaico, realizadas em 2006, 2008 e 2009 (neste realizadas as três últimas fases).

O uso do ortomosaico de Lídice, para esta tese, teve como funções servir de material preparativo de campo; como forma de mapear as feições erosivas; e composição das análises para diagnóstico da erosão. Seu uso foi extremamente útil como comparativo com as imagens do *Google Earth Pro*.

Há ainda, na página “arquivos *raster*”, as opções “imagens ortorretificadas” e “modelo digital de elevação”. A primeira compreende imagens de satélite, das quais apenas as pastas referentes aos satélites CBERS e Landsat TM incluem o Rio de Janeiro, em escala 1:250.000, não sendo utilizadas por não ser uma escala compatível com os objetivos da tese. A segunda traz os MDEs das mesmas articulações de cartas dos ortomosaicos, mas não foram utilizadas nesta pesquisa.

Dados SRTM (escala 1:250.000), com resolução espacial de 90 metros – SRTM V2 (LOUSADA e FERNANDES, 2017) – foram utilizadas no início da pesquisa, para testar a delimitação automática da bacia do rio Pirai. Isto apresentou divergências consideráveis frente às bases cartográficas do IBGE (RJ 1:25.000), levando o uso de produtos SRTM a ser desconsiderado para esta tese. Contudo, essas divergências serão abordadas no capítulo de discussão dos resultados. O download de dados SRTM foi feito através do site da EMBRAPA < <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/>>.

Além destes recursos elencados acima, tem sido cada vez mais importante o uso das imagens de satélite disponíveis no *software Google Earth Pro*. Seu uso é simples, requer direcionar até a área de estudo, seja por coordenadas, endereço ou de forma manual. Seleciona-se o melhor ângulo de visão da imagem, de acordo com o interesse do usuário, sendo possível salvar essa imagem, bem como incluir legendas e outras edições, como marcadores, linhas e polígonos. Geralmente, esta primeira imagem é bastante atual, obtida pelo satélite há alguns meses antes.

Mantendo a posição escolhida para salvar e utilizar a imagem, pode ser acessado o modo “imagens históricas” (botão representando um relógio). Surgirá uma barra de tempo que permite transitar entre imagens de meses e anos anteriores. Para cada local pode haver mais ou menos imagens e diferentes datas e períodos do dia imageados, sem obedecer a padrões de captura. Foram salvas imagens disponíveis de diversos anos (2001, 2004, 2007, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016 e 2017), mas nem todas são trabalhadas na tese, pois algumas apresentam qualidade aquém, para compor o diagnóstico da erosão na área de estudo. A importância das imagens do *Google Earth Pro* é relacionada às possibilidades que oferece. São muito úteis para planejar trabalhos de campo e foram importantes para checagem de ocorrência de erosão, comparativamente com o ortomosaico e com os trabalhos de campo.

Outro tipo de imagem que se mostrou interessante à pesquisa, constituindo nova ferramenta para uso dos serviços *Google* é o recurso *Google Street View*, presente no *Google Maps*. O *Street View* caracteriza-se por possuir fotos com continuidade espacial, tomadas pela passagem do “carro da *Google*”, que possui câmera de 360°. Até este ponto, não parece algo que possa ser pertinente. Contudo, também este recurso possui uma espécie de “imagens históricas de *Street View*”, fator que possibilita obter fotos da área desejada – caso haja disponibilidade – em momentos anteriores ao início da pesquisa. Isto poderia ser entendido como fazer uma tomada de fotos pretérita, como se fosse realizado um trabalho de campo em um tempo passado, em que é possível tirar fotos da área de estudo. Assim, as “imagens históricas” do *Google Street View* são mais um elemento que pode ser útil aos monitoramentos, quando pensados e praticados em escala local. Havia disponíveis e em boa qualidade imagens dos anos de 2011, 2012, 2015 e 2017.

Imagens *Google*, Ortomosaico do IBGE e mapas temáticos produzidos compõem o diagnóstico de degradação do solo pela erosão na bacia do Alto rio Pirai.

#### **4.3. ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS NO SOFTWARE ARCGIS**

Mapas temáticos elaborados em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), como os *softwares* ArcGIS e QuantumGIS, se tornaram comuns nas pesquisas geográficas, o que mostra sua importância, especialmente em análises de geomorfologia.

Para a confecção dos mapas utilizando as bases cartográficas levantadas, foram seguidos conhecimentos prévios de formação do autor, pautando-se em material didático elaborado por Ramos *et al.* (2011). Este integrou o curso de extensão universitária “Análise Espacial de Bacias Hidrográficas”, da grade de cursos do Labgis, vinculado à Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Consiste de um passo a passo com diversas práticas sobre a operacionalização de dados, por exemplo, de relevo e hidrografia, em ambiente SIG (em inglês, *GIS*). Envolve Modelos Digitais de Terreno, bacias hidrográficas em 3D, operações sobre superfícies de bacia hidrográfica, cálculo de parâmetros morfométricos, trabalho com imagens de satélite ASTER GDEM e, ainda, dados pluviométricos.

É necessário ressaltar que as práticas do material didático, utilizado como manual para a confecção dos mapas temáticos, trabalha com bases cartográficas de escala 1:50.000. Dessa forma, sempre que necessário, as recomendações da apostila são aprimoradas para a escala 1:25.000, utilizada na maior parte dos produtos desta pesquisa. Significa que alguns parâmetros da apostila são definidos para dados em 1:50.000, mas que esses parâmetros podem ser ajustados a outras escalas, sendo reduzidos, ou aumentados, em função da escala utilizada, para que a representação e visualização dos dados sejam condizentes com ela. Entre outros exemplos, há o caso do passo 1 da prática 3 (geração e avaliação do MDT-HC), onde recomenda-se que seja digitado o valor 10 no campo *Output cell size*, pois é resultado de 0,2 mm x 50.000, uma vez que os dados estão em escala 1:50.000. Como os dados da tese estão em escala 1:25.000, foi digitado para no campo *Output cell size* o valor 5, resultado de 0,2 mm x 25.000.

Antes de partir para a elaboração dos mapas temáticos, a base cartográfica foi toda reprojetada para o sistema geodésico de referência SIRGAS 2000, atualmente o único oficial para o Brasil (<https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtm#2> acessado em 30/04/2019) e para a projeção de Albers, conforme mencionado anteriormente. A partir disso, foi realizado o trabalho de interpolação de curvas e pontos para delimitação da bacia hidrográfica do Alto rio Piraí, através do *shapefile* do limite da bacia do rio Piraí. De posse dessa delimitação da área de estudo foi possível realizar os recortes necessários da base cartográfica para a elaboração dos mapas temáticos.

A primeira prática realizada foi a geração do MDT. Lembrando que este representa a altimetria do relevo, independente da presença ou não de objetos sobre ele. Ainda assim, cabem nesta seção maiores explicações sobre os Modelos Digitais do Terreno.

Conforme explicam Ramos *et al.* (2011), o MDT, enquanto superfície sintética que representa a distribuição espacial da variável altimetria (que é do tipo contínua no espaço), apresenta limitações advindas do processo de amostragem da superfície real do terreno. Estas amostras não forneceriam informações suficientes sobre a variação do relevo ao programa interpolador. Quer dizer, informações sobre fundos de vales, áreas planas e terrenos com baixa declividade, por exemplo. A superfície gerada a partir disso não seria hábil em representar determinadas características hidrológicas da área mapeada, a exemplo da direção de fluxo nos fundos de vale (RAMOS *et al.*, 2011).

A solução destes problemas, de acordo com a apostila de práticas em análise espacial de bacias hidrográficas, de Ramos *et al.* (2011), é o uso de interpoladores capazes de gerar o que se chama de MDT-HC, Modelos Digitais de Terreno Hidrologicamente Consistidos (ou Corrigidos). A amostragem realizada por estes unifica aos dados de relevo, como pontos cotados e curvas de nível (hipsométricas), dados referentes aos canais de drenagem (rios), lagos, depressões no relevo e outros elementos hidrográficos, porque tais interpoladores compreendem que a água é o principal agente modelador do relevo (RAMOS *et al.*, 2011). Portanto, o MDT gerado nesta pesquisa utilizou as informações hidrológicas da base cartográfica do IBGE para o Rio de Janeiro, na escala 1:25.000, para a geração do MDT-HC.

Após, foram realizadas análises do cálculo de declividade, da orientação do relevo (definindo as vertentes voltadas para norte e sul) e o mapa de forma das encostas (côncavas e convexas), partindo-se do MDT-HC. Estas análises são realizadas através das ferramentas *Slope* e *Aspect*, respectivamente. A primeira utiliza as informações referentes aos graus de declividade do relevo. A última refere-se ao azimute de orientação da superfície do MDT (RAMOS *et al.*, 2011).

#### **4.4. MONITORAMENTO DAS VOÇOROCAS**

Esta etapa da pesquisa reúne atividades de campo, de laboratório e de gabinete. Os trabalhos de campo à bacia do Alto rio Piraí, num total de 10, entre dezembro de 2015 e março de 2018, serviram para o reconhecimento da área de estudo, coleta de amostras de solo, dados de chuva e de informações sobre a bacia e seu histórico, realização dos voos com VANT (*drone*) e do escaneamento a laser terrestre. As etapas laboratoriais de análise das amostras de solo seguiram-se aos trabalhos de campo, até maio de 2018. As atividades de gabinete correspondem a todo o período da pesquisa, desde os levantamentos iniciais até a redação da presente tese.

##### **4.4.1. Imagens obtidas com VANT (*Drone*)**

O *drone* utilizado nesta tese, modelo **DJI Spark**, não realiza fotografias programadas previamente. Durante o voo, observa-se no aparelho smartphone, que funciona conectado como controlador remoto (Figura 17), e opta-se pelo registro fotográfico nas posições e altitudes que sejam de interesse do usuário.

Portanto, é um modelo de *drone* mais simples, diferente do utilizado nos trabalhos de Garritano *et al.* (2018a,b), desdobramentos conjuntos desta tese de doutorado e das pesquisas de mestrado de Garritano (em realização). O uso deste *drone* mais sofisticado sugere traçar um plano de voo, previamente à ida a campo, contendo a delimitação da área que se deseja imagear, a altitude do voo e a quantidade de fotos a serem registradas.

O *drone* utilizado por Garritano *et al.* (2018a,b) é capaz de registrar dezenas de fotos automaticamente, de acordo com o plano de voo estabelecido em gabinete. O quadro 1 abaixo apresenta as principais especificações dos dois modelos citados.

Dessa forma, o imageamento produzido pelo uso de VANT (*drone*) nesta pesquisa teve caráter qualitativo para a composição de diagnóstico da degradação pela erosão por voçorocas, e representar um indicativo do uso das geotecnologias no estudo deste tipo de fenômeno. A utilização de outros modelos mais sofisticados, como o de Garritano *et al.* (2018a,b), pode gerar mapas de hipsometria, concentração de fluxo superficial, relação solo x planta (nível de cobertura vegetal presente e de exposição do solo) e modelos 3D das

encostas com voçorocamento, bem como permitem medir largura, comprimento e profundidade e produzir perfis. Estas possibilidades, porém, não se aplicam nesta tese, mas são aqui apontadas.



Figura 17 – Utilização do *drone* DJI Spark durante trabalho de campo em dezembro de 2017. No círculo vermelho a sombra do drone no momento da tomada da foto. No círculo amarelo, o smartphone acoplado ao controlador de voo do *drone*. Foto: Fabrizio Garritano (2017).

Quadro 1 – Especificações do *drone* DJI Spark utilizado nesta tese e do modelo usado em Garritano *et al.* (2018a,b). Elaboração do autor.

Modelo	Especificações
DJI Spark	Câmera: Sensor 12 MP CMOS 1/2.3" com Lente f2.6 FOV 81.9° 25 mm Velocidade do obturador eletrônico: 2-18000 segundos Disparo único; disparo contínuo (3 quadros) Dimensões da imagem: 3968x2976 Nenhum tipo de georreferenciamento
DJI MAVIC PRO 2018	Câmera: Sensor 12,35 MP CMOS 1/2.3" com Lente f2.2 FOV 78.8° 26 mm RGB (red, green, blue) Velocidade do obturador eletrônico: 8s -1/8000 s Disparo único; disparo contínuo (3/5/7 quadros) Dimensões da imagem: 4000x3000 Resolução espacial: 4,7 cm/pixel Sistema de posicionamento por satélite: GPS/GLONASS

#### 4.4.2. Uso de *Laser Scanner* (LST)

O equipamento de *laser scanner* utilizado nesta tese, *Leica ScanStation C10*, pertence ao Laboratório GeoCart (Laboratório de Cartografia – Geografia/UFRJ), gentilmente oferecido e cedido pelo professor doutor Manoel do Couto Fernandes, em 2017, para ser testado em ambiente de voçorocamento. Adquirido, então, há pouco tempo, nenhuma pesquisa ou produtos a partir de sua utilização haviam sido publicados. No mês de julho de 2017, integrantes do GeoCart participaram de curso introdutório da fabricante e distribuidora *Leica Geosystems* e, assim, MSc. Tainá Laeta e MSc. Kairo Santos puderam manusear o aparelho em trabalho de campo na **voçoroca A** (figuras 20 e 21).

O plano inicial previa a varredura a laser em dois momentos do período chuvoso, no município de Rio Claro. O primeiro trabalho de campo para escaneamento da Voçoroca A seria realizado em dezembro de 2017 e o segundo em março de 2018. Porém, com dificuldades em relação à agenda dos integrantes necessários ao trabalho de campo e, também, ao transporte para campo, foi realizado apenas um trabalho de campo de varredura a laser, em 27 de fevereiro de 2018.

Outro empecilho, desta vez em campo, foram os eventos de chuva, ocorridos durante o trabalho de campo (fracos) e, principalmente, na véspera da ida a campo, com grandes volumes de água atingindo a área de estudo. Isto trouxe duas dificuldades: (1) não foi possível acessar o interior da voçoroca A, como era pretendido, devido à saturação e estado de elevada plasticidade dos sedimentos mobilizados (figura 18), que fazia com que pessoas e equipamentos afundassem bastante no material erodido; e (2) porque, ao final da última varredura, iniciou-se chuva fraca, impedindo que o equipamento permanecesse exposto e, por conseguinte, fosse utilizado novamente naquele momento. Em todo o caso, ainda que o aparelho pudesse receber chuva diretamente, não é recomendado realizar a varredura com chuva, porque resulta em medidas mais pobres, além de poluir a nuvem de pontos com o escaneamento das gotas de chuva.



Figura 18 – Interior da voçoroca A teve o material encharcado por grande volume de chuvas no dia anterior ao escaneamento, impedindo que fosse seguro acessar, inclusive com equipamentos pesados. Foto: Hugo A. S. Loureiro (2018).

Assim, com tais percalços, a varredura *laser* se deu da seguinte forma: três pontos próximos às bordas da feição, na superfície da encosta, foram selecionados – nomeados como A1, A2 e A3, da esquerda para a direita da voçoroca (figura 19) – para posicionar o *Laser Scanner* e efetuar três ângulos de varredura distintos, a fim de cobrir a totalidade da voçoroca, por sua parte externa; enquanto o escâner é posicionado em um dos pontos, nos outros dois pontos são colocados dois alvos, originais do conjunto *Leica*, para serem escaneados, como pontos de controle, para auxiliar o posicionamento dos dados (figura 20), ou seja, das nuvens de pontos e das imagens geradas. Desse modo, foram realizadas três varreduras, para serem unificadas em gabinete, através de *software* próprio da *Leica*, que acompanha todo o conjunto do equipamento.

Não foi possível retornar a campo e realizar uma segunda varredura devido a alguns fatores, como: (1) demora no processamento dos dados da 1ª varredura, uma vez que a experiência no uso do *software* é reduzida; (2) necessidade de visualização de vídeos tutoriais, disponíveis na plataforma YouTube (vide referências bibliográficas), sempre com exemplos relacionados à engenharia e ambientes artificiais; (3) questões de agenda dos pesquisadores; (4) dificuldade crescente quanto à disponibilidade de transporte.

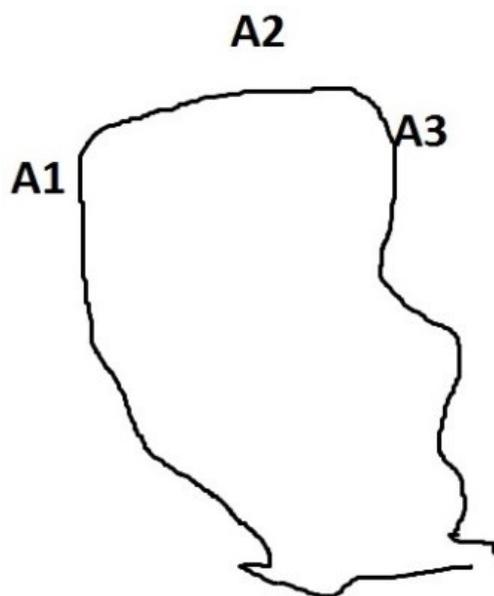


Figura 19 – Reprodução da representação esquemática realizada em trabalho de campo mostrando a posição relativa dos pontos A1, A2 e A3 na voçoroca A. Elaboração do autor.



Figura 20 – Fixados no solo com tripés, os alvos são obrigatórios para posicionar os dados no ambiente digital de processamento. No detalhe, o alvo do ponto A3, à direita da voçoroca. Na imagem da direita, Tainá e Kairo “bolhando” o alvo do ponto A1, à esquerda da voçoroca. Fotos: Diego Janoti (2018).

Para realizar a varredura a laser em campo é necessário sair do ângulo de visada do raio laser, pois este oferece riscos à visão humana em caso de contato direto. Tanto o *laser scanner* como seus alvos são instalados em tripés, fixados ao solo e “bolhados” corretamente, para garantir a precisão.

A resolução da nuvem de pontos gerada (até 50 mil pontos/segundo) deve ser ajustada previamente à varredura (figura 21). Ela pode ser muito alta, com 2 cm de precisão; alta, 5 cm; média, 10 cm; e baixa, 20 cm. Já o campo de visão máximo do *Laser Scanner* é de 360° x 270°, para as visões horizontal e vertical, respectivamente. O manual do *Leica Laser ScanStation C10* está disponível para *download* em PDF pelo link <<https://kb.sccssurvey.co.uk/download/138/leica-c5-c10/2194/leica-scanstation-c10-c5-user-manual.pdf>>.



Figura 21 – Etapa de configuração de varredura do *Leica Laser Scanner*, definindo resolução, área e angulação para escaneamento. Fotos: Diego Janoti (2018); Hugo A. S. Loureiro (2018).

Dos três pontos de varredura realizados, o primeiro deles, no ponto A2, à montante da cabeceira da voçoroca, teve resolução alta, de 5 cm. Por essa escolha, o tempo de escaneamento foi de 26 minutos, considerando a área delimitada a ser varrida pelo *laser scanner*. Devido à aproximação de nuvens de chuva, obstaculizando o trabalho, as duas

varreduras seguintes, em pontos nas laterais esquerda (A1) e direita (A3) da feição erosiva foram realizadas com precisão média, de 10 cm, o que fez o processo de escaneamento durar 4 e 6 minutos, respectivamente. A angulação do campo de visão escolhida para o escaneamento da voçoroca A foi de 90° x 90°, para que fosse obtido o máximo possível de detalhes da voçoroca A e seu entorno.

Após retornar do campo, bastou inserir um *pen drive* para realizar, durante algo em torno de dois a três minutos, a coleta dos dados escaneados (figura 22). Estes são armazenados em pasta criada no início do trabalho de campo, direcionando os três pontos de escaneamento e todos os seus dados e produtos para tal pasta – que ficou com apenas 1,67 GB – de forma organizada, relativa a cada ponto de varredura. Este fato é importante para o processamento computacional pós-campo. Significa que uma única pasta contendo os variados escaneamentos que foram realizados para uma mesma área de estudo tornará mais fácil e organizado transferir e registrar os dados no *software*.



Figura 22 – Transferência dos dados de varredura do *Leica Laser Scanner* para pen drive. Fotos: Hugo A. S. Loureiro (2018).

Criada a base de dados no computador que dispõe da licença vitalícia, no Laboratório GeoCart, com as pastas para processamento e destinação do que for produzido, é realizada a importação dos dados do *pen drive* para o computador. Deste ponto inicia-se o processamento das nuvens de pontos do *Laser Scanner*. A primeira medida é unificar as nuvens de pontos geradas nos pontos A1, A2 e A3, em pares. Ou seja, é possível juntar A1

com A2, e a partir disso, A3 é unificada automaticamente ou juntar A1 com A3 e A2 ser unificada de modo automático; e assim por diante. Na figura 23, é possível notar as coordenadas espaciais X, Y e Z representando o ponto a partir do qual a nuvem foi gerada e os demais pontos com suas respectivas nomenclaturas.

Assim, na imagem da estação 001 (primeira varredura da pasta), à esquerda, o *Laser Scanner* produziu a nuvem de pontos a partir do ponto A2, à montante da cabeceira. Já na imagem da estação 002 (segunda varredura da pasta), à direita, o aparelho fez o escaneamento fixado no ponto A3. Logo, a estação 003 representa a nuvem de pontos gerada do ponto A1. A junção das nuvens de pontos é feita a partir dos alvos e gera uma nuvem de pontos bruta (figura 24), com todos os elementos escaneados. Isto inclui a chuva (pontos em azul claro), verificada apenas na nuvem de pontos gerada por último, ou seja, no ponto A1, estação 003, exatamente a varredura finalizada com ocorrência de chuva fraca e uso de guarda-chuva para proteger o equipamento. Imperfeições como esta podem ser removidas durante o processamento.

As etapas de processamento que foram possíveis de serem realizadas no *software Cyclone*, da Leica Geosystem geraram produtos de suma importância para o diagnóstico da área da voçoroca A. Foram geradas curvas de nível, que levaram ao modelo de hipsometria da voçoroca, e foram realizados cálculos de área e volume, a partir de diferentes modelos derivados da sucessão de tais etapas. Todos esses são analisados e especificados na apresentação e discussão dos resultados.

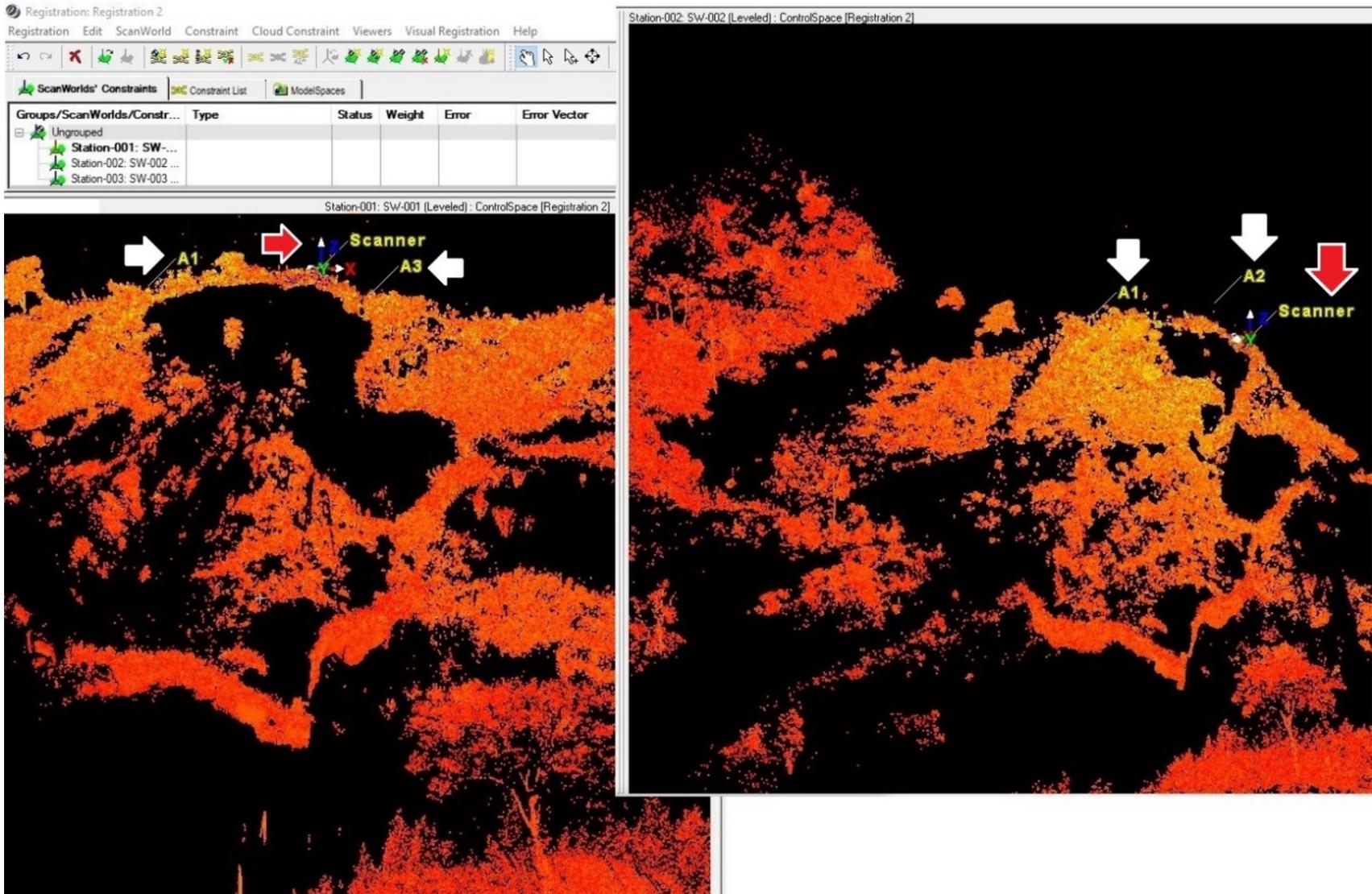


Figura 23 – Junção das nuvens de pontos, primeira etapa de processamento. Setas brancas indicam o ponto onde estavam os alvos. Setas vermelhas indicam o ponto de onde o Scanner fez a varredura. Organizado pelo autor.

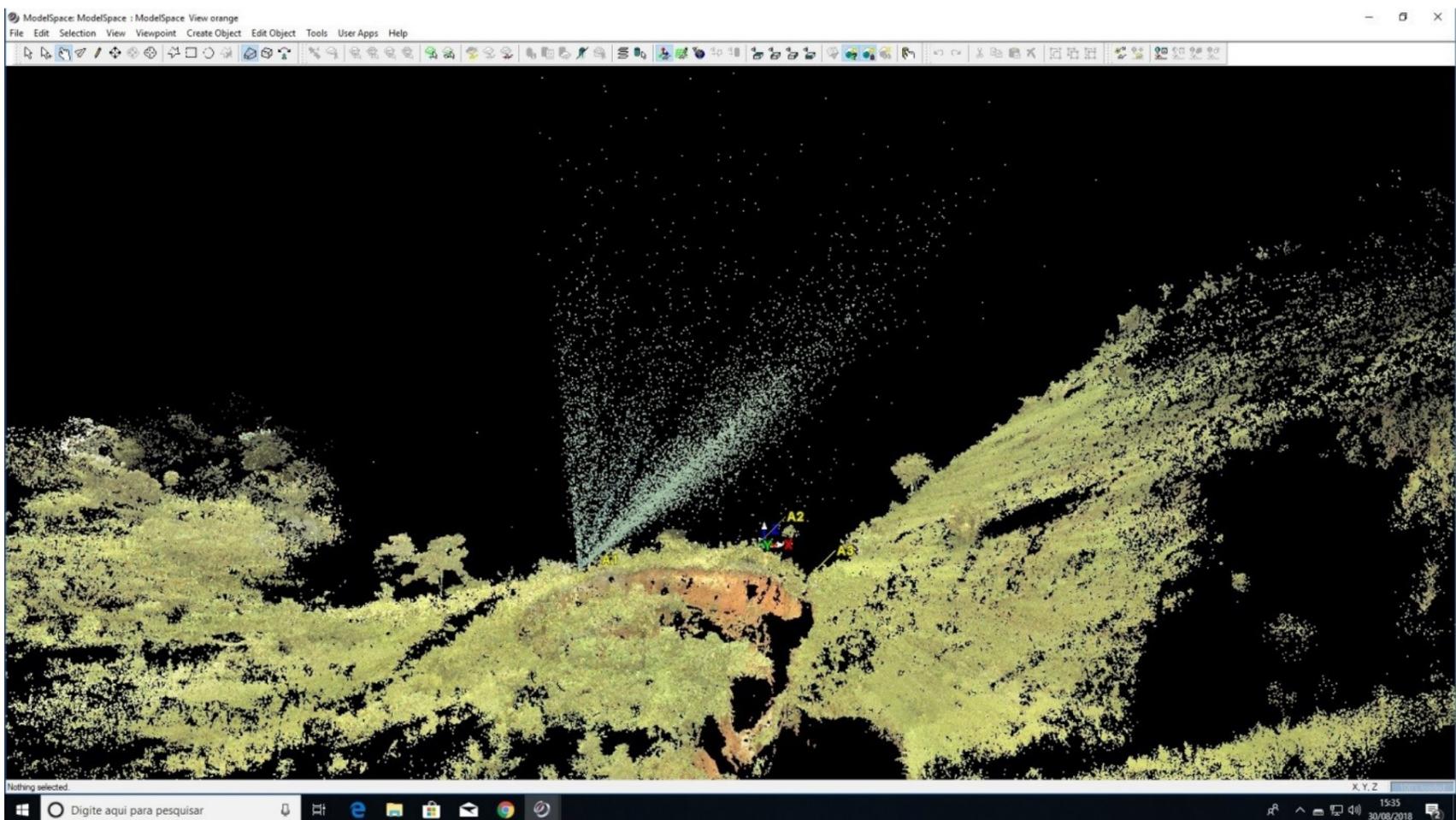


Figura 24 – Captura de tela após a junção das nuvens de A1, A2 e A3, com ativação do modo de cores reais. Note que o ponto A2 aparece junto às coordenadas espaciais X, Y, Z, indicando o ponto principal da varredura. Nota-se, também que a chuva é registrada a partir do ponto A1, à esquerda desta imagem.

#### **4.5. COLETAS DE AMOSTRAS DE SOLO E ANÁLISES EM LABORATÓRIO**

As amostras de solo são fundamentais para avaliar sua erodibilidade e, assim, compor um diagnóstico da degradação e do processo erosivo. Foram coletadas amostras deformadas e volumétricas para análise no Laboratório de Geomorfologia Maria Regina Mousinho de Meis, do Departamento de Geografia da UFRJ.

Para realizar as análises granulométricas; de densidade do solo (ou aparente), densidade de partículas; porosidade; e teor de matéria orgânica, através da oxidação do carbono orgânico por titulação com dicromato de potássio, foi seguido o Manual de Métodos de Análise do Solo (DONAGEMA *et al.*, 2011) da EMBRAPA Solos.

A maioria das amostras volumétricas foi coletada em triplicata, enquanto nos pontos em que isso não foi possível, a coleta foi realizada em duplicata, sempre com coletor volumétrico com anel de Kopecky, de 100 cm<sup>3</sup>. Já as amostras deformadas, foram coletadas, em sua maioria, através do perfil exposto, seja nas paredes das voçorocas ou pela abertura de pequenas trincheiras, enquanto dois pontos foram coletados com o trado holandês.

Aquelas amostras coletadas nas paredes das voçorocas obedeceram ao seguinte padrão de coleta: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-50 cm, 50-100 cm até 200-250 cm, conforme fosse possível. Já as coletas realizadas na superfície das encostas próximas das voçorocas foram obtidas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. No laboratório, todas as deformadas foram analisadas em triplicata. Nem todas as profundidades tiveram a sua respectiva amostra volumétrica coletada, devido a dificuldades em campo.

A seguir, a tabela 3 traz as quantidades de cada tipo de amostra (deformada e volumétrica) conseguidas em cada ponto, de acordo com o local (sítio) estudado. Assim, os principais resultados são das áreas da voçoroca A (onde também se localiza a voçoroca Q – área que foi queimada) e da voçoroca B, havendo ainda resultados da área da voçoroca C e da voçoroca da Fazenda Sant’Ana.

Tabela 3 – Total e distribuição da quantidade de amostras por tipo, deformadas e volumétricas, em cada ponto de coleta nos diferentes sítios.

Sítio	Ponto	Deformadas	Volumétricas	Sítio	Ponto	Deformadas	Volumétricas
<b>A</b>	AP1	6	6	<b>B</b>	BPD	6	2
	AP2	5	4		BPE	7	7
	QP1	4	0		BS1	2	2
	AS1	2	2		BS2	2	1
	AS2	2	2		BS3	2	2
	QS1	2	2		Bi1	2	0
					Bi2	2	0
<b>Outros</b>	FS1	2	1	<b>Totais</b>		48	33
	CS1	2	2				

**AP** – parede da voçoroca A; **QP** – parede da voçoroca Q (área queimada no sítio A); **AS** – superficial na voçoroca A; **QS** – superficial na voçoroca Q; **BPD** – parede direita da voçoroca B; **BPE** – parede esquerda da voçoroca B; **BS** – superficial na voçoroca B; **Bi** – no interior da voçoroca B; **FS1** – superficial em voçoroca na Fazenda Sant’Ana; **CS1** – superficial na voçoroca C.

#### 4.5.1. Granulometria e textura

Conceitualmente, a textura representa as frações granulométricas (*particle size distribution*) do solo, que são os tipos de partículas componentes do solo, de acordo com seus tamanhos. A suscetibilidade dos solos à erosão dependerá da proporção dessas frações, conforme explicado no capítulo anterior.

Identificar a textura do solo requer conhecer as proporções de cada fração, através da análise granulométrica ou textural, que consiste, de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (DONAGEMA *et al.*, 2011), na velocidade e tempo de decantação das partículas em suspensão do solo com água, adicionada a algum dispersante químico. Ou seja, a análise da granulometria visa individualizar as partículas de areia, silte e argila, separando-as. Com a decantação das partículas (figura 25), de acordo com seus tamanhos, é possível calcular os teores de cada fração granulométrica, e identificar as classes texturais dos solos analisados (BRADY, 1989; LEPSCH, 2011).



Figura 25 – Análise granulométrica pelo método da pipeta. Na imagem, a etapa de decantação de silte e argila nas provetas de 1.000 mL. Foto: Hugo A. S. Loreiro, 2018.

De acordo com a distribuição de cada uma das três frações granulométricas (argila, silte e areia) é possível obter a classe textural daquele solo (amostra), visualmente, através do triângulo textural ou utilizando calculadoras de triângulo textural disponíveis na internet, como o site do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA): <[https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2\\_054167](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167)>.

#### **4.5.2. Densidade do Solo, Densidade de Partículas e Porosidade**

A análise da densidade do solo (ou aparente) utiliza amostras volumétricas ou indeformadas, considerando o volume do anel coletor para o cálculo final da análise. O coletor volumétrico que será utilizado possui 100 cm<sup>3</sup> (Figura 26). O método empregado pelo Manual da Embrapa é bastante simples e visa mensurar a massa de solo com poros tendo a água sido retirada durante o período em estufa.

O método da densidade de partículas é comumente utilizado para servir de base para o cálculo da porosidade total. Desta análise se obtém quanto de solo há sem os poros e a água, através do preenchimento de álcool em balão volumétrico.

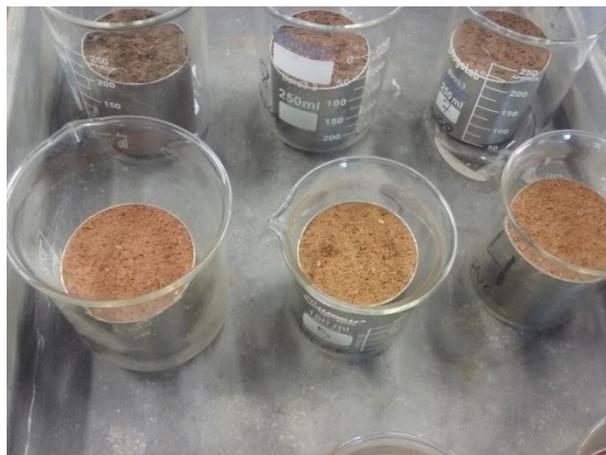


Figura 26 – amostras volumétricas coletadas em anéis de 100 cm<sup>3</sup> durante análise em laboratório. Foto: Hugo A. S. Loureiro (2016).

A porosidade total é facilmente obtida, a partir destes dois valores de densidade aparente e densidade de partículas (ou real), correspondendo à macro e microporosidade somadas. Com o volume do anel volumétrico sendo de 100 cm<sup>3</sup>, adapta-se a fórmula do Manual de Análise de Solos da EMBRAPA (DONAGEMA *et al.*, 2011), de modo que: **Porosidade Total (%) = 100 (a-b)/a**; onde *a* é a densidade real e *b* é a densidade do solo.

#### 4.5.3. Estabilidade de Agregados

Para realizar essa análise há diversas metodologias e suas adaptações. A variedade se dá pelo diâmetro de malha das peneiras utilizadas no processamento das amostras, pelo tipo e tempo do pré-umedecimento e, também, pela quantidade de amostras a serem processadas (SÁ *et al.*, 2000; CASTRO FILHO *et al.*, 2002; CESÁRIO *et al.*, 2010; DONAGEMA *et al.*, 2011; MA *et al.*, 2014; JAKŠÍK *et al.* 2015).

Dentre as diferentes metodologias, a base para a maioria é o trabalho de Yoder (1936), através de índices de agregação, medindo a estabilidade dos agregados em água, por via úmida, como pode ser chamado. Devido a isso, o equipamento que realiza os testes, o aparelho de oscilação vertical, é conhecido como “aparelho de Yoder” (CESÁRIO *et al.*, 2010; RODRIGUES, 2016; RANGEL e GUERRA, 2017). Ele mede a quantidade e a distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água, para interpretação da estabilidade e resistência dos agregados (RODRIGUES, 2016; RANGEL e GUERRA, 2017).

São avaliados o **diâmetro médio geométrico (DMG)**, uma estimativa do tamanho médio dos agregados mais presentes no solo, o **diâmetro médio ponderado (DMP)**, que será maior, quanto maior for a percentagem dos maiores agregados retidos nas peneiras de maiores malhas, e o **índice de estabilidade de agregados (IEA)**, medida da agregação total (que não considera as classes de distribuição de tamanho dos agregados), que significa que quanto maior for a quantidade de agregados menores que 0,25 mm, menor será o índice (CASTRO FILHO *et al.*, 1998; RANGEL e GUERRA, 2017).

A análise da estabilidade dos agregados seguiu as recomendações de Cesário *et al.* (2010). As amostras de solo, em blocos (figura 27), foram coletadas nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, a partir da abertura de pequenas trincheiras. Estas amostras foram coletadas sempre na superfície das encostas, para os pontos AS1 e QS1 no sítio A e BS1 no sítio B (vide tabela 3, página 122).



Figura 27 – Blocos de solo do ponto QS1, com siglas de campo e laboratório, nas profundidades 10-20 e 0-10 cm, respectivamente. Foto: Hugo A. S. Loureiro (2018).

Após seguir todas as etapas da análise laboratorial da estabilidade de agregados por via úmida (figura 28), com método adaptado de Yoder (CASTRO FILHO *et al.*, 1998; CESÁRIO *et al.*, 2010; DONAGEMMA *et al.*, 2011; RANGEL, 2014; NEVES, 2015; RODRIGUES, 2016), as

equações para o cálculo dos diâmetros e do índice de estabilidade de agregados são apresentados abaixo (EQUAÇÕES 1). Com esses cálculos, também é possível determinar a distribuição de macro e microagregados (%) (NEVES, 2015; RANGEL e GUERRA, 2017).

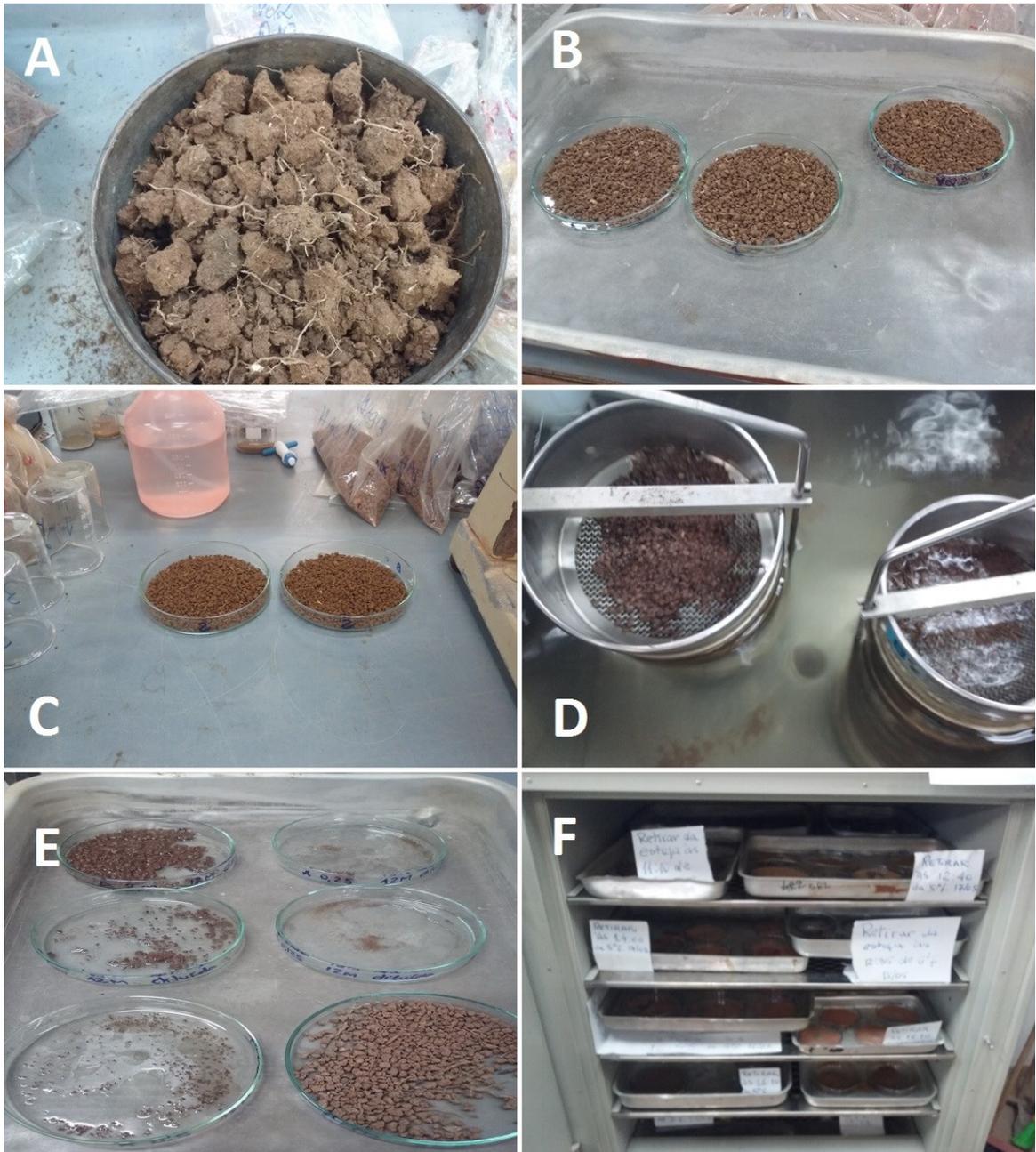


Figura 28 – Alguns passos da análise de estabilidade de agregados. Em A, peneiramento do bloco com leve destorroamento com as mãos, para restarem agregados maiores que 2 mm; em B, 25g de agregados pesados, separados em uma amostra para o cálculo da umidade e duas amostras para os dois jogos de peneiras; em C, as amostras recebem borrifadas de água pré-peneiramento úmido; em D, o processo de peneiramento úmido no aparelho de Yoder; em E, os macro e microagregados em suas respectivas placas petri, após retirados de cada peneira; em F, diversas amostras de agregados na etapa de secagem à 40°C. Fotos: Hugo A. S. Loureiro (2018).

Ainda sobre os cálculos, cabem algumas observações, quanto à diferenciação de alguns pontos do procedimento. Rangel (2014) não descontou a areia, julgando que tais partículas participam do processo de agregação do solo. Já Cesário *et al.* (2010) propuseram descontar a areia retida apenas nas peneiras de 0,25 mm e abaixo, uma vez que o limite padrão de areia fina é 0,2 mm. Nesta tese, apesar de seguir principalmente este último trabalho, também não houve desconto da fração areia, conforme Rangel (2014).

- DMP através da equação abaixo, em que  $w_i$  = proporção (%) de cada classe em relação ao total; e  $x_i$  = diâmetro médio das classes, expresso em mm:

$$DMP (mm) = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i)$$

- DMG através da equação abaixo, em que  $w_i$  = proporção (%) de cada classe em relação ao total; e  $x_i$  = diâmetro médio das classes, expresso em mm:

$$DMG (mm) = \exp \frac{\sum w_i \ln x_i}{\sum w_i}$$

- IEA (%) obtido pela equação:

$$IEA = \frac{\text{peso total dos agregados} - \text{peso dos agregados} < 0,25\text{mm}}{\text{peso da amostra seca}} \times 100$$

EQUAÇÕES 1 – Equações de Kemper e Rosenau (1986 *in* RANGEL, 2014) modificadas por Castro Filho *et al.* (2002). Fonte: Neves (2015).

#### 4.5.4. Teor de Matéria Orgânica do Solo

Para obter os teores de matéria orgânica foi empregado um dos métodos mais comumente utilizados, tanto para análises científicas como comerciais (SILVÉRIO e GONÇALVES, 2008), sendo um dos mais observados em trabalhos acadêmicos e manuais técnicos de análise de solos (DIAS e LIMA, 2004; IBGE, 2005 e 2007; ESCOSTEGUY *et al.*, 2007; DONAGEMA *et al.*, 2011). O método da oxidação do carbono orgânico pelo dicromato de potássio, que resulta, indiretamente, no teor de matéria orgânica (Figura 29).

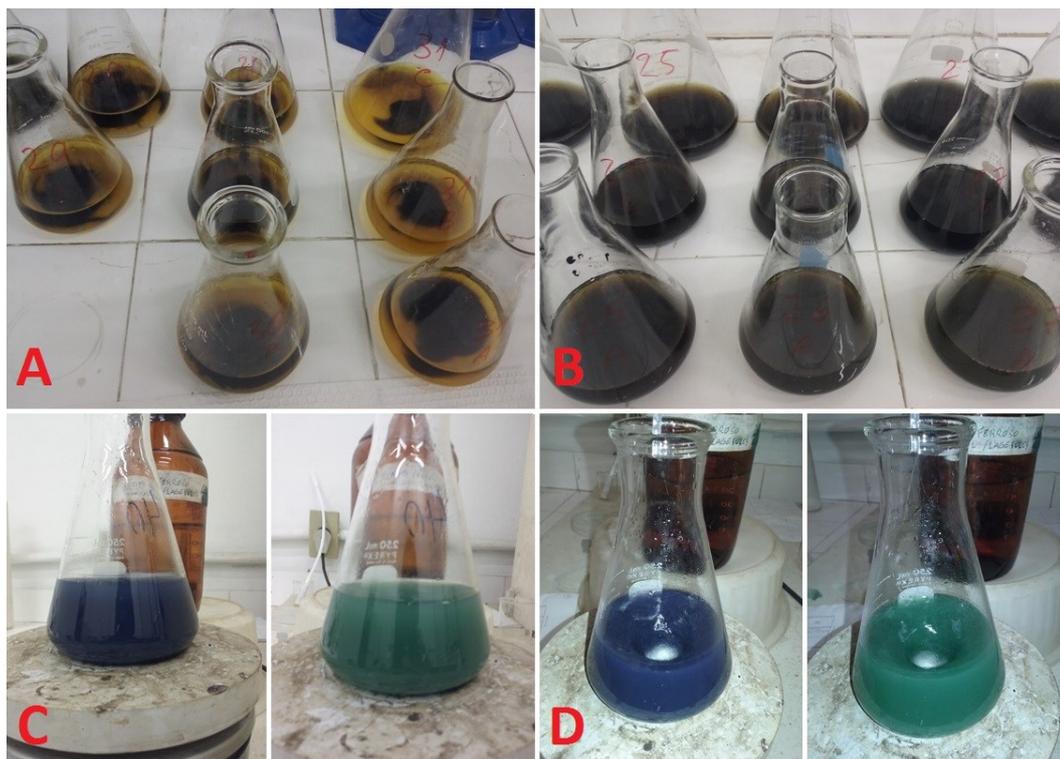


Figura 29 – Algumas etapas da análise química da matéria orgânica. Em A, 0,5 g de solo peneirado (ou 0,25 se diluído) com dicromato de potássio já fervido brandamente e adição do indicador difenilamina; em B, a difenilamina homogeneizada na solução ácida; em C e D dois ângulos e iluminações distintas para mostrar o processo de titulação enquanto se adiciona sulfato ferroso amoniacal; quando a solução muda da cor azul para a verde deve-se registrar o quanto do sulfato foi necessário gastar para processar a amostra.

Loureiro (2013) levantou diversas referências bibliográficas (DIAS e LIMA, 2004; IBGE, 2005 e 2007; ESCOSTEGUY *et al.*, 2007; SILVÉRIO e GONÇALVES, 2008) para expor algumas das limitações deste método e do método de combustão da matéria orgânica, em forno mufla. Neste último, a perda de massa pela queima no forno mufla, em variadas temperaturas, superestima os valores de matéria orgânica (DIAS e LIMA, 2004; ESCOSTEGUY *et al.*, 2007), enquanto que o método do dicromato de potássio, utilizado nesta tese, apresenta valores subestimados (SILVÉRIO e GONÇALVES, 2008).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este capítulo se subdivide em três seções, em que são apresentados e discutidos os resultados das análises de solo e dos experimentos realizados com a aplicação de geotecnologias, para o diagnóstico dos processos erosivos lineares (voçorocas) nas diferentes áreas estudadas na bacia hidrográfica do Alto rio Pirai (Rio Claro-RJ).

Na primeira parte, debate-se a erodibilidade do solo. Esta pode ser verificada por meio de análises integradas das diferentes propriedades físicas e químicas do solo, como mencionadas no referencial teórico. Dentre aquelas citadas, foram analisadas: **granulometria**, que estabelece as classes texturais; **densidade do solo ou aparente (DS)**; **porosidade total (PT)**, obtida indiretamente pela relação entre DS e densidade de partículas; o teor de **matéria orgânica do solo (MOS)**; e os **índices de estabilidade de agregados**.

A segunda seção deste capítulo tem por objetivo discutir as diferenças e complementariedades dos métodos tradicionais e recentes, como **pinos de erosão** (por experiências anteriores), imagens de **VANT** e produtos de **Laser Scanner Terrestre** (ambos realizados nesta pesquisa). A exemplo de Solé-Benet *et al.* (2012), que compararam técnicas clássicas e modernas de monitoramento de erosão, ao monitorarem voçoroca ativa, no chamado Deserto de Tabernas (Espanha).

Na última, é feito um diagnóstico da erosão dos solos. Buscou-se, através do uso experimental dos métodos, extrair o máximo de dados do processamento da nuvem de pontos gerada no **Laser Scanner Terrestre (LST)**, das possibilidades de análise oferecidas por imagens do **Google Earth**, do **VANT** e do **Ortofotomosaico do IBGE**. Semelhante ao que foi feito por Etchelar (2017), que usou técnicas manuais (estaqueamento), de imageamento por satélite e de varredura com LST, para mapear e quantificar o avanço em área de voçoroca na APA do Banhado Grande (RS), para o período de 2003 a 2015.

Antes de seccionar os resultados, é importante abordar um problema constatado durante a delimitação da bacia do Alto rio Pirai. Há problemas, talvez graves, a se investigar sobre os limites da bacia hidrográfica estudada, relativos ao limite estadual Rio de Janeiro – São Paulo. O processamento de extração automática de limites de bacias dos dados SRTM (com 90 metros de resolução espacial) e as bases cartográficas do IBGE apresentam

inconformidades, gerando problemas geomorfológicos e cartográficos. Nesta pesquisa, por não haver objetivos sobre questões intrínsecas ao geoprocessamento e à cartografia, optou-se por seguir as bases oficiais do IBGE, bem como instituições oficiais que utilizam as mesmas bases, como o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Guandu e o INEA. Estes fatos servem como resultados importantes da pesquisa, pois levam à sua continuidade futura na busca por tais respostas. Na figura 30, em vermelho, o limite da bacia do Alto rio Pirai, segundo o IBGE e, com mesmo tom de amarelo dentro e fora desse limite, a delimitação do que seria a bacia, a partir dos dados SRTM.

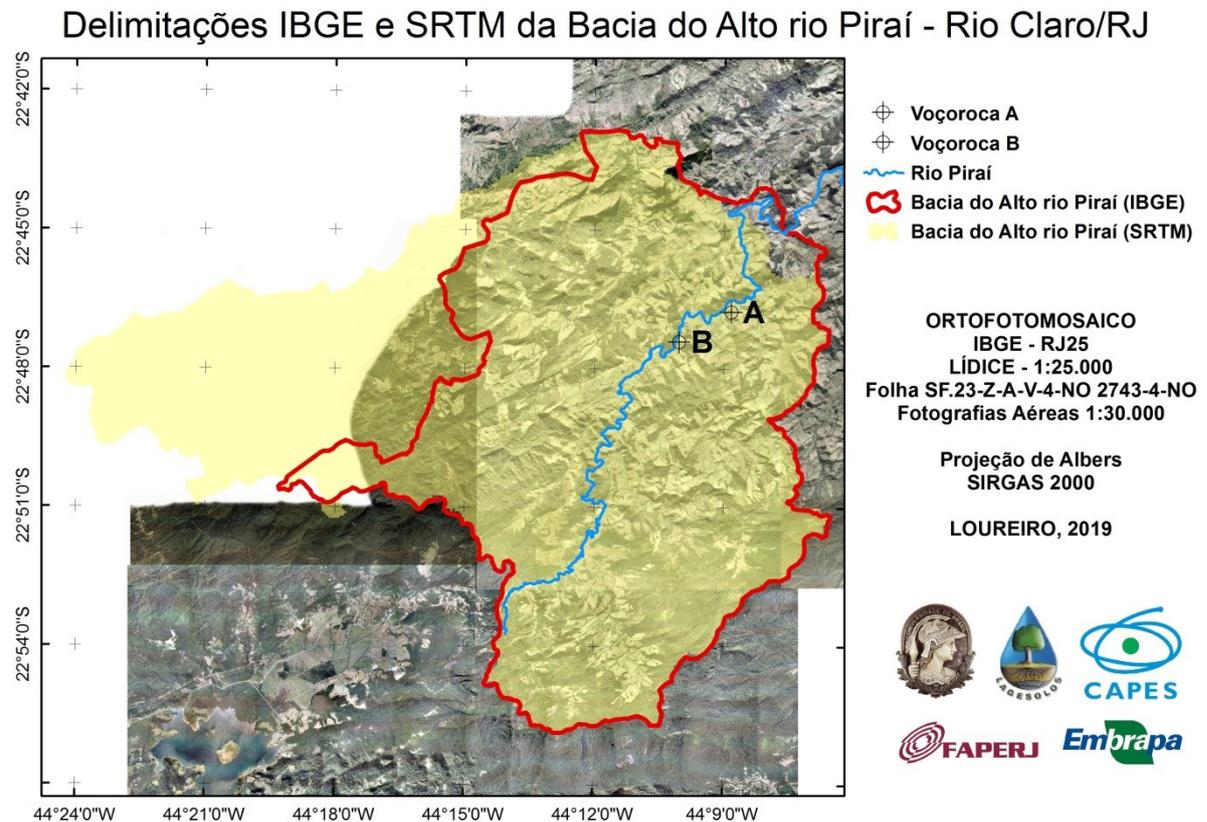


Figura 30 – Incoerência cartográfica na delimitação de bacia hidrográfica, abrindo caminho para o aprimoramento dos estudos realizados nesta pesquisa em trabalhos futuros. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

### **5.1. ERODIBILIDADE DO SOLO**

Os resultados das análises granulométricas dos solos amostrados das paredes (AP1 e AP2) e da superfície da encosta (AS1) na área da Voçoroca A, incluindo a parte incendiada

em setembro de 2017 (QP1 e QS1); das paredes da Voçoroca B (BPD e BPE), seu interior (Bi1 e Bi2) e na superfície de suas encostas (BS1, BS2 e BS3); em área de pasto a montante de voçoroca na Fazenda Sant'Ana do Sobradinho (FS1); e na superfície da encosta da voçoroca C (CS1), apresentaram diversidade de classes texturais. Variaram entre franco arenosa, franco argilo-arenosa, franco argilosa, argila arenosa, argila e uma franco siltosa (tabela 4).

Se considerarmos a diferenciação entre texturas arenosa, média e argilosa, conforme Medeiros *et al.* (2006), apenas os pontos BS2, Bi (1 e 2), e FS1 (figura 31) são de textura arenosa, por possuírem menos que 15% de argila e em torno de 70% ou mais de areia. Entre as amostras superficiais, apenas CS1 (10 a 20 cm) apresenta textura argilosa (acima de 35% de argila), composta por 431g/kg (43,1%). As demais texturas argilosas foram constatadas em amostras das paredes das voçorocas A (incluindo Q) e B, sempre em suas profundidades subsuperficiais (a partir de 10 a 20 cm), exceto AP2 (100 a 150 cm). Esta apresentou textura média, representada pelo equilíbrio entre as frações, quando há em torno de 30 a 40% de argila e areia. A textura média foi característica de todas as amostras de 0 a 10 cm de profundidade das paredes das voçorocas A, Q e B, bem como das superficiais (0-10 e 10-20 cm) AS1, AS2, QS1, BS1 e BS3.



Figura 31 – Coleta no ponto FS1, em área de pasto acima da estrada, em propriedade vizinha à Fazenda Sant'Ana. À esquerda o topo do solo (0-10 e 10-20 cm) e à direita fragmentos de rocha a partir de 30 cm, com mudança de cor. Fotos: Hugo Alves S. Loureiro (2017).

A tabela 4 apresenta, de forma resumida, essa variação textural, através das médias dos dados das profundidades de cada ponto de coleta e das cinco classes texturais citadas anteriormente (exceto a classe franco siltosa, específica da amostra BPE 200 a 250 cm). Cabe mencionar que AS e QS foram unificadas na média, por representarem a superfície da mesma área de estudo A (nas profundidades 0-10 e 10-20 cm).

Tabela 4 – Médias das propriedades físicas e química por ponto de coleta.

Área de Coleta	Granulometria (g/kg)						Densidade do Solo (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade Total (m <sup>3</sup> . m <sup>-3</sup> )	Matéria Orgânica (%)	Classe Textural
	Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila	AF+S				
AP1	363,33	136,00	499,33	120,67	380,00	256,67	1,56	0,41	0,86	argila arenosa
AP2	415,60	157,40	573,00	154,80	272,20	312,20	1,69	0,37	1,25	fran. arg. are.
QP1	386,50	152,50	539,00	106,25	354,75	258,75	n.d.	n.d.	1,19	argila arenosa
AS e QS	421,83	155,67	577,50	162,33	260,17	318,00	1,56	0,40	3,36	fran. arg. are.
BPD	342,33	103,67	446,00	146,50	407,50	250,17	1,40	0,46	2,61	argila
BPE	310,00	92,00	402,00	247,43	350,57	339,43	1,43	0,45	1,96	franco argilosa
BS	491,50	108,17	599,67	207,83	192,50	316,00	1,41	0,44	5,18	franco arenosa
Bi	514,50	195,75	710,25	189,75	100,00	385,50	n.d.	n.d.	1,87	franco arenosa
FS1	431,50	272,00	703,50	172,00	124,50	444,00	1,51*	0,40*	3,39	franco arenosa
CS1	225,50	116,50	342,00	281,00	377,00	397,50	1,34	0,47	3,25	franco argilosa

\* Valores de DS e PT para FS1 não representam média, pois há dados somente da profundidade de 0 a 10 cm. Sigla “n.d.” significa que “não há dados”. **AP** – parede da voçoroca A; **QP** – parede da voçoroca Q (área queimada no sítio A); **AS** – superficial na voçoroca A; **QS** – superficial na voçoroca Q; **BPD** – parede direita da voçoroca B; **BPE** – parede esquerda da voçoroca B; **BS** – superficial na voçoroca B; **Bi** – no interior da voçoroca B; **FS1** – superficial em voçoroca na Fazenda Sant’Ana; **CS1** – superficial na voçoroca C.

Esta tabela também permite verificar uma diferenciação entre as áreas de estudo da Voçoroca A e da Voçoroca B. A primeira apresenta solo mais compactado, com maior densidade (acima de 1,50 g/cm<sup>3</sup>), conseqüentemente, menor porosidade total, além de menores teores de MOS, variando de 0,86% a 1,25% nas paredes das voçorocas. Enquanto a B apresenta densidade abaixo de 1,50 g/cm<sup>3</sup>, valor limitante entre baixa e alta densidade (MORGAN, 2005), porosidades pouco maiores e teores de MOS mais elevados, entre 1,87%, no interior da Voçoroca B, e 2,61%, em suas paredes. Já as amostras de superfície (S) apresentaram os maiores teores de MOS, com 3,25% (CS1) a 5,18% (BS), por ação da vegetação (gramíneas e reflorestamento) e até da decomposição de fezes bovinas.

Tais números condizem com a característica erosiva de cada área (figura 32). Ou seja, a maior e menor propensão à erosão em cada local. Na área da Voçoroca A o processo erosivo é mais pronunciado, com solo mais exposto nas paredes da feição. Isto indica maior suscetibilidade deste solo à erosão e menor aporte de matéria orgânica. Na área da Voçoroca B, a feição apresenta-se mais estável, inclusive nos pontos de coleta, uma vez que o local de maior atividade erosiva possui mais cobertura vegetal, inicialmente estabelecida de modo natural e somente após, melhorada através de reflorestamento pelo Instituto Terra de Preservação Ambiental (ITPA).

Seguindo essa linha de análise, que aponta a área de estudo A como de maior suscetibilidade erosiva, a tabela 5 traz dados detalhados para cada profundidade de coleta nas paredes das voçorocas A e Q. Sua análise ajuda na compreensão dessa hipótese.

Tabela 5 – Resultados das análises físicas e química para as paredes da área A.

Área de Coleta	Profundidade (cm)	Granulometria (g/kg)						Densidade do Solo (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade Total (m <sup>3</sup> . m <sup>-3</sup> )	Matéria Orgânica (%)	Classe Textural
		Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila	AF+S				
AP1	0-10	370	139	509	212	279	351	1,39	0,47	2,42	fran. arg. are.
	10-20	343	154	497	120	383	274	1,59	0,41	0,88	argila arenosa
	20-50	335	142	477	109	414	251	1,48	0,44	0,98	argila arenosa
	50-100	377	108	485	95	420	203	1,53	0,42	0,34	argila arenosa
	100-150 (am)	367	143	510	90	400	233	1,68	0,36	0,34	argila arenosa
	100-150 (vm)	388	130	518	98	384	228	1,66	0,38	0,20	argila arenosa
AP2	0-10	499	132	631	179	190	311	1,56	0,40	3,13	franco arenosa
	10-20	357	162	519	178	303	340	1,73	0,36	1,47	fran. arg. are.
	20-50	376	185	561	157	282	342	1,76	0,34	0,74	fran. arg. are.
	50-100	433	151	584	134	282	285	1,72	0,37	0,56	fran. arg. are.
	100-150	413	157	570	126	304	283	n.d.	n.d.	0,35	fran. arg. are.
QP1	0-10	414	194	608	130	262	324	n.d.	n.d.	1,91	fran. arg. are.
	10-20	407	122	529	112	359	234	n.d.	n.d.	1,31	argila arenosa
	20-50	354	163	517	100	383	263	n.d.	n.d.	0,96	argila arenosa
	50-100	371	131	502	83	415	214	n.d.	n.d.	0,57	argila arenosa

Onde, n.d. – não há dados. **AP** – parede da voçoroca A; **QP** – parede da voçoroca Q (área queimada no sítio A).

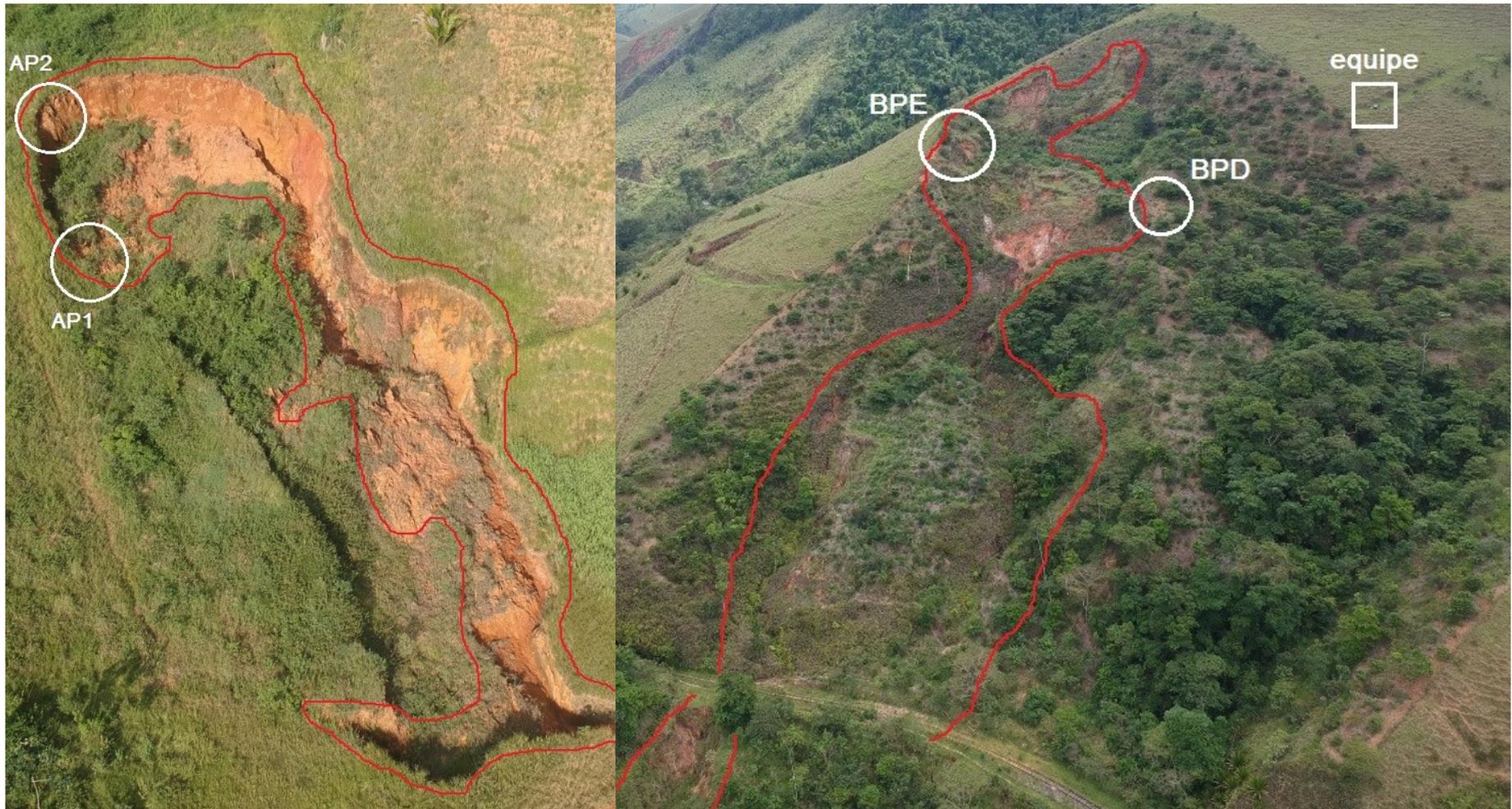


Figura 32 – Pontos de coleta (em branco) e delimitação arbitrária de áreas com maior ação erosiva nas Voçorocas A e B (em vermelho). Destaque para a diferença de cobertura vegetal. Acervo: LAGESOLOS – VANT (2018 e 2017), por Fabrizio Garritano e Hugo Alves S. Loureiro.

Partindo da análise granulométrica, a textura mais argilosa (classe argila arenosa) presente em oito das 15 profundidades amostradas poderia significar a negação da hipótese mencionada acima, pois se espera que solos com maiores teores da fração argila sejam mais coesos e resistentes à erosão (WISCHMEIER e MANNERING, 1969; MEDEIROS *et al.*, 2006; SILVA e GUERRA, 2015). Porém, tal característica por si só não é suficiente para determinar sua erodibilidade (BONILLA e JOHNSON, 2012; OUYANG *et al.*, 2018). Deve-se considerar quanto das frações silte e areia fina compõem o solo, já que são as frações mais sujeitas à ação erosiva (POESEN *et al.*, 2003; FULLEN e CATT, 2004; MORGAN, 2005; GUERRA, 2005b; GUERRA *et al.*, 2017; LOUREIRO *et al.*, 2018).

Nesse sentido, diversos autores apontam (FULLEN e CATT, 2004; MORGAN, 2005; LIMA, 2008; SMETS *et al.*, 2011; LOUREIRO, 2010 e 2013; LOUREIRO *et al.*, 2011; BONILLA e JOHNSON, 2012; RANGEL *et al.*, 2019) que solos com uma combinação de silte e areia fina a partir de 400g/kg (40%) são, sobremaneira, mais vulneráveis aos processos erosivos. Contudo, os teores de areia fina e silte somados não alcançaram esse valor determinante em nenhuma das amostras do local A. Entende-se, então, que não é a granulometria o principal fator no acentuado processo de erosão presente ali.

Sendo assim, é preciso observar os valores de DS, em AP1 e AP2. Neste último encontram-se os maiores valores de densidade do solo entre todos os pontos coletados nesta pesquisa, com 1,73 g/cm<sup>3</sup> (10-20 cm), 1,76 g/cm<sup>3</sup> (20 a 50 cm) e 1,72 g/cm<sup>3</sup> (50-100 cm). Cabe salientar que AP2 localiza-se na cabeceira da voçoroca, portanto, área de intensa atividade da feição, com solapamento de paredes e recuo de bordas. A camada de 0 a 10 cm registrou 1,56 g/cm<sup>3</sup>, menor apenas que outros quatro pontos de coleta, AS1, AS2, QS1 e BS1 (tabela 7, na página 141). No ponto AP1, com exceção das profundidades 0 a 10 cm (1,39 g/cm<sup>3</sup>) e 20 a 50 cm (1,48 g/cm<sup>3</sup>), as demais densidades registram valores entre 1,53 g/cm<sup>3</sup> e 1,68 g/cm<sup>3</sup>, portanto, acima do limite anteriormente citado de 1,50 g/cm<sup>3</sup>.

Ainda assim, há valores-limite alternativos a considerar. Rangel e Guerra (2018a) destacaram valores de “densidade do solo crítica” (REICHERT *et al.*, 2003), em dependência ao tipo de solo e classe textural. Os primeiros citam o trabalho de Argenton *et al.* (2005 *in* RANGEL e GUERRA, 2018a), que verificaram aeração deficitária, a partir de 1,30 g/cm<sup>3</sup> de densidade do solo para Latossolo Vermelho argiloso. De acordo com o mapa de solos em

capítulo anterior, dominam na área da pesquisada exatamente os Latossolos. Isto indica que, considerando os dados de DS obtidos no presente estudo, grande parte está acima desse valor, caracterizando-se como um problema que favorece a erosão.

Já Reichert *et al.* (2003) estabeleceram densidades do solo críticas de 1,30 g/cm<sup>3</sup> a 1,40 g/cm<sup>3</sup> em solos argilosos (mais de 55% de argila), 1,40 g/cm<sup>3</sup> a 1,50 g/cm<sup>3</sup> em solos franco argilosos (textura média, com 20 a 55% de argila), e 1,70 a 1,80 g/cm<sup>3</sup> em solos franco arenosos (menos de 20% de argila). Seguindo a proposta de Reichert *et al.* (2003), Rangel e Guerra (2018a) classificaram a DS como crítica em pontos com valores de 1,4 g/cm<sup>3</sup> e 1,5 g/cm<sup>3</sup> e textura franco arenosa.

Na área A, portanto, verificam-se altos valores de DS (1,39 g/cm<sup>3</sup> a 1,76 g/cm<sup>3</sup>) em texturas médias a argilosas, respectivamente, franco argilo arenosa e argila arenosa. Significa que AP2 ultrapassou a DS crítica, o que não contribui para menor suscetibilidade à erosão, pois a compactação é acentuada. Para Fullen e Catt (2004), em média, valores entre 1,0 g/cm<sup>3</sup> e 1,4 g/cm<sup>3</sup> indicam compactação baixa à moderada e acima de 1,4 g/cm<sup>3</sup> representa solos compactos. Santos *et al.* (2016) concordam, e afirmam que valores abaixo de 1,0 g/cm<sup>3</sup> significam baixa compactação. Isto vai de encontro às ideias de Kiehl (1979), segundo o qual áreas de florestas apresentam DS entre 0,6 e 0,8 g/cm<sup>3</sup> e áreas com manejo inadequado têm DS entre 1,1 a 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Nota-se que há valores acima destes últimos, reforçando más condições do solo perante a erosão.

Chamam atenção, também, os baixos teores de matéria orgânica. Pereira *et al.* (2016) obtiveram média de 0,5% de MOS nas parcelas com solo exposto e 4,2% em área de floresta próxima da estação experimental. Na tabela 5 anterior, os teores de MOS variaram entre 0,20% e 1,47% para profundidades a partir de 10 cm. São dados importantes, que indicam baixa qualidade do solo na área de estudo. Além de estarem muito abaixo do limite de 3,5%, considerado como baixo teor de MOS (FULLEN e CATT, 2004; MORGAN, 2005; LOUREIRO, 2013; GUERRA, 2016; GUERRA *et al.*, 2017; SANTOS, 2017; RANGEL e GUERRA, 2018a), estão abaixo de 2%, cujos valores inferiores estabelecem baixa estabilidade de agregados (DE PLOEY e POESEN, 1985 *in* PEREIRA *et al.*, 2016). Já nas camadas de 0 a 10 cm, os teores de MOS corresponderam a 2,42% (AP1), 3,13% (AP2) e 1,91% (QP1). Este pode indicar menor MOS devido ao incêndio.

Bonilla e Johnson (2012) estudaram matéria orgânica e textura na relação com a erodibilidade, no Chile Central, e verificaram que solos com textura fina (argila e silte) apresentavam maiores teores de matéria orgânica. Os autores citam uma faixa no tamanho das partículas do solo (DI STEFANO e FERRERO, 2002 *in* BONILLA e JOHNSON, 2012), correspondente à areia fina e ao silte, em que para além dela, nos tamanhos maiores (areias) ou menores (argilas), a erodibilidade diminui. Isto ocorre porque partículas maiores possuem massa maior e partículas menores apresentam forças de coesão, assim, ambos os casos dificultam desprender e transportar tais partículas (BONILLA e JOHNSON, 2012). Keller e Hakansson (2010) analisaram o efeito da textura em relação à DS e afirmaram que há uma correlação positiva entre os teores de argila (mais forte a partir de 300 g/kg) e matéria orgânica, que influencia na redução da DS. Koiter *et al.* (2017), ao estudarem áreas agrícolas distintas em bacias hidrográficas no Canadá, apresentaram resultados que corroboram tal relação, pois o aumento do teor de argila acompanhava o aumento dos teores de MOS.

Contudo, a maioria dos casos verificados por Keller e Hakansson (2010), Bonilla e Johnson (2012) e Koiter *et al.* (2017) não ocorrem na presente pesquisa, visto que há teores altos de argila, solos com texturas médias a argilosas e pouca MOS. A única relação verificada é a inversa entre DS e MOS, pois há baixos teores de MOS e elevada DS.

Solos argilosos, apesar de possuírem alta capacidade de retenção de água e maior resistência às ações erosivas, são menos permeáveis e mais vulneráveis à compactação (MEDEIROS *et al.*, 2006), características que favorecem, conseqüentemente, a formação do escoamento superficial. Eis um argumento que explica a maior erodibilidade da área de estudo A: não a granulometria em si, mas a classe textural aliada a altas densidades do solo, baixas porosidades e baixos teores de MOS. A sinergia (BONILLA e JOHNSON, 2012) dessas propriedades físicas e química indica uma menor importância das frações silte e areia fina, quando elevados teores de argila são combinados a condições de solo compactado, pouco poroso e de baixo a muito baixo teor de matéria orgânica.

Apesar de esta explicação ser bastante plausível, deve-se considerar a possibilidade de os teores de silte terem sofrido reduções, em função do transporte durante eventos de chuva. Pereira *et al.* (2016), monitorando parcelas de erosão na bacia do rio Maranduba (Ubatuba – SP), verificaram que 52% do material removido das parcelas, transportado até os

galões de armazenamento de água e sedimentos, correspondeu à fração silte. Em seus estudos a média dos teores desta fração nos solos das parcelas correspondeu a  $239 \text{ g/cm}^3$ , ou seja, presença maior que a verificada nos pontos AP1, AP2 e QP1, cujos teores variaram de  $83 \text{ g/cm}^3$  a  $179 \text{ g/cm}^3$ , com *outlier* de  $21,2 \text{ g/cm}^3$  em AP1 (0-10).

Porém, as parcelas possuíam, em média,  $213 \text{ g/cm}^3$  de argila, sendo esta fração responsável por 34,1% do material retido nos galões (PEREIRA *et al.*, 2016). Na área de estudo A os teores de argila foram sempre maiores que  $262 \text{ g/cm}^3$  (exceto  $190 \text{ g/cm}^3$  em AP2 0-10 cm). Ou seja, a proporção de silte e argila nos estudos de Pereira *et al.* (2016) e na presente pesquisa é inversa. Nesta há menos silte e mais argila, enquanto naquela há mais silte e menos argila. Logo, não é possível estabelecer relação direta equivalente, pois significaria que no presente estudo o carregamento de silte em solução teria que ser maior que o encontrado por Pereira *et al.* (2016). Por isso, aqui, o argumento da redução dos teores de silte, por transporte durante processo erosivo, não tem potencial explicativo igual.

Para seguir com a hipótese sobre a erodibilidade de cada área, os resultados da tabela 6, para a área de estudo B, devem ser bem observados. Apresentam diferenças que corroboram tal hipótese, pois os indicadores analisados apresentam-se, majoritariamente, em condições de menor vulnerabilidade do que foi encontrado para a área A.

Comparando as duas tabelas, verifica-se que as paredes da voçoroca B apresentam maiores teores da fração silte, que é de mais fácil remoção (WISCHMEIER e MANNERING, 1969; FULLEN e CATT, 2004; MORGAN, 2005; LOUREIRO, 2013; CARDOSO DA SILVA e GUERRA, 2015; GUERRA, 2016; GUERRA *et al.*, 2017; KOITER *et al.*, 2017; LOUREIRO *et al.*, 2018). Contudo, tais teores de silte não são considerados elevados, variando de  $91 \text{ g/kg}$  a  $201 \text{ g/kg}$  nas profundidades a partir de 10 cm e registrando  $230 \text{ g/kg}$  e  $275 \text{ g/kg}$  na camada de 0 a 10 cm. A única exceção foi BPE 200 a 250 cm, o ponto mais profundo, este sim contendo teor muito alto de silte ( $633 \text{ g/kg}$ ). Estas afirmações consideram discussões de diferentes autores.

Lima (2008), ao avaliar a suscetibilidade de solos à erosão na bacia do rio Macaé (RJ), afirmou que teores de silte em torno de  $350 \text{ g/kg}$  seriam inexpressivos, a princípio, embora determinem média a alta suscetibilidade erosiva, se combinados a teores significativos de areia fina. Guerra *et al.* (2010) e Rangel e Guerra (2018a), para condições de teores de areia

finas maiores que 90 g/kg, argila menor que 50 g/kg e MOS menor que 1%, consideraram que teores de silte a partir de 200 g/kg são elevados, caracterizando alta suscetibilidade à erosão. Já Bonilla e Johnson (2012), analisando a erodibilidade no Chile Central, verificaram que solos que continham menos de 400 g/kg da fração silte registraram os valores mais baixos do fator de erodibilidade.

Tabela 6 – Resultados das análises físicas e química para as paredes da área B.

Área de Coleta	Profundidade (cm)	Granulometria (g/kg)						Densidade do Solo (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade Total (m <sup>3</sup> . m <sup>-3</sup> )	Matéria Orgânica (%)	Classe Textural
		Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila	AF+S				
BPD	0-10	397	98	495	230	275	328	1,26	0,51	6,62	fran. arg. are.
	10-20	317	119	436	199	365	318	1,53	0,42	3,92	franco argilosa
	20-50	308	103	411	130	459	233	n.d.	n.d.	2,18	argila
	50-100	374	81	455	95	450	176	n.d.	n.d.	1,60	argila arenosa
	100-150	311	116	427	91	482	207	n.d.	n.d.	0,96	argila
	150-200	347	105	452	134	414	239	n.d.	n.d.	0,38	argila arenosa
BPE	0-10	341	94	435	275	290	369	1,30	0,48	6,10	franco argilosa
	10-20	359	92	451	201	348	293	1,39	0,46	2,56	fran. arg. are.
	20-50	315	97	412	200	388	297	1,50	0,43	1,67	franco argilosa
	50-100	289	82	371	157	472	239	1,42	0,46	1,24	argila
	100-150	317	76	393	139	468	215	1,49	0,44	1,01	argila
	150-200	330	95	425	127	448	222	1,38	0,49	0,87	argila
	200-250	219	108	327	633	40	741	1,55	0,41	0,24	franco siltosa

**BPD** – parede direita da voçoroca B; **BPE** – parede esquerda da voçoroca B.

Portanto, com base nesses autores, é possível dizer que os teores de silte encontrados no presente estudo (de 83 a 297 g/kg) não são tidos como elevados, pois não ultrapassam 300 g/kg, enquanto que os poucos valores acima de 200 g/kg não correspondem a teores de argila inferiores a 50 g/kg. Pelo contrário, a quantidade de argila apresenta-se de forma equilibrada na comparação entre as áreas A/Q e B, sempre acima de 300, 400 e até 450 g/kg a partir de 10 cm de profundidade. Ou seja, novamente há outros parâmetros que se sobressaem em importância perante o silte.

Um desses é a proporção de areia fina. Estudos anteriores mencionam a relação íntima entre erodibilidade e a presença de elevados teores de areia fina e silte juntos (FULLEN e CATT, 2004; MORGAN, 2005; LIMA, 2008; LOUREIRO, 2013; GUERRA, 2016; GUERRA *et al.*, 2017; KOITER *et al.*, 2017; RANGEL e GUERRA, 2018a; OUYANG *et al.*, 2018; entre outros). Por isso, é importante notar que teores de areia fina acima de 100 g/kg são considerados altos (GUERRA *et al.*, 2010; SANTOS, 2017). Dito isto, ao analisar as tabelas

anteriores nota-se que na área A os teores de areia fina estiveram sempre acima de deste valor, entre 108 g/kg e 194 g/kg. Já na área B, oito amostras contam com teores de areia fina inferiores, de 76 g/kg a 98 g/kg, e apenas cinco profundidades variam entre 103 g/kg e 119 g/kg. Ou seja, o teor de areia fina em B corrobora com a hipótese de menor erodibilidade em comparação à área A, pois o teor de areia fina é alto em A e moderado em B. Destaca-se, ainda, que os teores somados de silte e areia fina acabam registrando equilíbrio entre A e B.

Outro parâmetro analisado, que deixa mais clara a diferenciação entre A e B é a densidade do solo. O local A registra sempre as maiores DS, enquanto o local B, inversamente proporcional, registra os melhores valores de PT. Ainda mais clara é a diferença dos teores de MOS. As paredes da voçoroca B apresentaram sempre teores de MOS maiores que na voçoroca A. Mesmo que gradativamente os teores de MOS vão diminuindo quanto mais se aprofunda no perfil, a matéria orgânica é maior em B. Assim, os dados analisados, expostos nas tabelas 6 e 7, confirmam: a área B é mais estável do que a área A. Em B existem condições que levam à menor erodibilidade de seus solos em comparação com o local A, quando analisadas suas propriedades físicas e teor de MOS.

A tabela 7, a seguir, traz os resultados das análises realizadas para amostras coletadas na superfície das encostas onde se localizam as voçorocas ou próximas a elas (FS1), todas coletadas nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. Em termos de granulometria, os pontos AS (e QS), BS1 e BS3 e CS1 acompanham os respectivos pontos nas paredes das voçorocas, apresentando texturas médias em 0 a 10 cm e texturas argilosas a partir de 10 cm. Exceções são BS2, Bi 1 e 2 e FS1, conforme mencionado sobre as médias.

Os valores de DS acima de  $1,5 \text{ g/cm}^3$  são registrados nos pontos AS1, AS2, QS1, BS1 e FS1 em ambas as profundidades, quando há. Chamam a atenção, principalmente, a DS do ponto BS3, com  $1,16 \text{ g/cm}^3$  (0-10), o menor valor para as amostras de superfície de encosta. Este ponto teve a coleta realizada em março de 2018, num dos locais com melhor desenvolvimento do reflorestamento, o que pode ser um indicador da melhoria da estrutura do solo em função do crescimento da vegetação, seu sistema radicular e aporte de matéria orgânica pela serrapilheira (figura 33). Durante o trabalho de campo foi notória a diferença de estrutura da vegetação e das condições do solo desde fevereiro de 2017, então última vez que foi realizada atividade do lado de dentro da cerca da voçoroca B.

Tabela 7 – Resultados das análises físicas e química para os pontos coletados na superfície das encostas (0-10 e 10-20 cm).

Área de Coleta	Profundidade (cm)	Granulometria (g/kg)						Densidade do Solo (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade Total (m <sup>3</sup> . m <sup>-3</sup> )	Matéria Orgânica (%)	Classe Textural
		Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila	AF+S				
AS1	0-10	431	143	574	176	250	319	1,50	0,42	3,61	fran. arg. are.
	10-20	391	185	576	188	236	373	1,59	0,39	3,02	fran. arg. are.
AS2	0-10	496	155	651	153	196	308	1,53	0,40	3,78	franco arenoso
	10-20	491	142	633	170	197	312	1,62	0,39	3,12	franco arenoso
QS1	0-10	383	160	543	131	326	291	1,58	0,39	3,55	fran. arg. are.
	10-20	339	149	488	156	356	305	1,56	0,40	3,08	argila arenosa
BS1	0-10	425	118	543	267	190	385	1,49	0,41	5,90	franco arenoso
	10-20	435	146	581	173	246	319	1,60	0,38	2,12	fran. arg. are.
BS2	0-10	593	96	689	208	103	304	1,34	0,45	8,76	franco arenoso
	10-20	577	142	719	158	123	300	n.d.	n.d.	5,64	franco arenoso
BS3	0-10	427	77	504	254	242	331	1,16	0,54	4,88	fran. arg. are.
	10-20	492	70	562	187	251	257	1,48	0,41	3,78	fran. arg. are.
Bi1	0-10	560	164	724	162	114	326	n.d.	n.d.	1,08	franco arenoso
	10-20	455	179	634	228	138	407	n.d.	n.d.	2,68	franco arenoso
Bi2	0-10	508	231	739	189	72	420	n.d.	n.d.	2,29	franco arenoso
	10-20	535	209	744	180	76	389	n.d.	n.d.	1,42	franco arenoso
FS1	0-10	440	275	715	184	101	459	1,51	0,40	3,60	franco arenoso
	10-20	423	269	692	160	148	429	n.d.	n.d.	3,17	franco arenoso
CS1	0-10	264	112	376	301	323	413	1,28	0,49	4,06	franco argilosa
	10-20	187	121	308	261	431	382	1,39	0,45	2,44	argila

**AS** – superficial na voçoroca A; **QS** – superficial na voçoroca Q; **BS** – superficial na voçoroca B; **Bi** – no interior da voçoroca B; **FS1** – superficial em voçoroca na Fazenda Sant'Ana; **CS1** – superficial na voçoroca C.



Figura 33 – Ponto de coleta BS3, com vegetação se desenvolvendo bem, geração de serrapilheira e aporte de matéria orgânica. Foto: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

A camada 0 a 10 de QP1 (1,91% - coletada em setembro de 2017) apresenta menor MOS que a mesma camada de AP1 (2,42%) e AP2 (3,13%). Porém, comparando os teores de MOS das amostras superficiais AS1, AS2 e QS1 (esta última de dezembro de 2017), a variação é pequena, de 3,55% (QS1) a 3,78% (AS2) para 0 a 10 cm de profundidade, e 3,02% a 3,12% em 10 a 20 cm. Isso pode indicar que o incêndio teve atuação mais determinante sobre o solo exposto na parede da voçoroca Q (ponto QP1), do que no solo coberto por gramíneas na superfície da encosta (QS1), justamente pelo nível de presença de cobertura protegendo o solo.

Porém, como não há amostras anteriores ao incêndio, em razão da inacessibilidade do local quando vegetado, não é possível dimensionar os efeitos da queimada. Há que se considerar, também, que a própria superfície da encosta (QS1) pode ter sido resiliente o bastante para contar com aporte de matéria orgânica entre os trabalhos de campo de setembro (coleta de QP1 menos de 48h após o incêndio) e dezembro (coleta de QS1).

Os teores de MOS na área de estudo B foram bastante variados, mas ao compará-los entre os locais de coleta (encostas, interior e paredes da voçoroca) são possíveis algumas observações. As amostras das profundidades de 0 a 10 cm mostraram-se com teores elevados nas encostas e paredes: 5,90% em BS1; 8,76 em BS2; 4,88 em BS3; 6,62% em BPD; e 6,10% em BPE. Considerando o uso da área como pastagem e os pontos BS1 e BS2 tendo sido coletados fora da área cercada pelo ITPA para reflorestamento, ou seja, locais ativos, são valores que causam estranhamento inicial. Principalmente se comparados a teores de MOS encontrados por outros autores em áreas não degradadas ou florestadas, como estudos de Neves (2011), Santos (2017) e Jorge (2017).

Na sub-bacia do rio São Pedro (Macaé-RJ), Neves (2011) determinou os teores de MOS para amostras de 0 a 20 cm, através da perda de massa por ignição em forno mufla (BALL, 1964), método direto que superestima os teores (LOUREIRO, 2013). A autora verificou variações entre 4,23% e 5,39% para áreas com cobertura florestal e entre 1,72% e 4,62% para áreas degradadas por pastagens. Santos (2017) avaliou a erosão na bacia do rio Pequeno (Paraty-RJ) e encontrou mais MOS acima de 7% em 0 a 10 cm de solo em florestas secundárias. Enquanto Jorge (2017) analisou, em diversas trilhas de Ubatuba (SP), o solo

pisoteado e seus taludes, nos primeiros 10 cm. Esta autora obteve médias de MOS entre 2,44% e 8,55%, desde trilhas mais abertas e degradadas às mais fechadas e conservadas.

Portanto, a referida estranheza se daria pelo fato de o local B, coberto por gramíneas e usado como pasto, registrar teores de MOS (em 0 a 10 cm) que se equiparam a áreas florestadas, em diferentes níveis, a exemplo do ponto BS2, com 8,76% de MOS, acima do maior teor entre os autores citados acima, 8.55% (JORGE, 2017).

Contudo, Santos (2017) analisou, ainda, amostras de solo de pastagens, obtendo valores de MOS que, conforme afirmou, são superiores aos limites mínimos que possibilitam boa estrutura e resistência ao solo, ou seja, 3,5% de MOS (MORGAN, 2005). Esses teores variaram entre 3,85% e 6,82%, com *outlier* de 14,35%. O autor atribuiu os altos valores à cobertura de gramíneas, que ofertam matéria orgânica ao morrerem e se decomporem no próprio local, e aos excrementos dos bovinos. Esta última hipótese é considerável, inclusive porque em laboratório a amostra com maior MOS (8,76%), BS2 (0-10 cm), apresentou odores mais pronunciados, semelhantes às fezes do gado, durante a análise granulométrica, quando o material fica armazenado em solução durante algumas horas. Os resultados de MOS para os pontos FS1 (com 3,60%) e CS1 (com 4,06%), ambas as áreas de pastagem ativa, concordam com as análises de Neves (2011) e Santos (2017) em áreas de pasto.

Os demais teores de MOS, notadamente, vão sendo reduzidos à medida que se aprofunda a coleta, seja nas paredes das voçorocas A e B (pontos "P") ou nas encostas do entorno (pontos "S"). O único ponto divergente, entre todos os que tiveram a matéria orgânica analisada, foi Bi1, que apresentou crescimento do teor de MOS ao passar de 0 a 10 para 10 a 20 cm. Nenhum indício das razões para esta situação foi verificado.

Neste ponto é interessante analisar conjuntamente todos os resultados de PT. Nas tabelas anteriores os dados de porosidade total estão apresentados em  $m^3.m^{-3}$ . Adiante, a figura 34 esquematiza diferentes resultados, em porcentagem (%), encontrados para a porosidade total em diferentes estudos (GROHMAMM, 1975; KIEHL, 1979; LIMA, 2008; LOUREIRO, 2010, 2013; NEVES, 2011; RANGEL e GUERRA, 2014, 2017; CARDOSO DA SILVA e GUERRA, 2015; PEREIRA *et al.*, 2016), incluindo a presente pesquisa. Alguns dos quais buscaram definir o que seria considerado como baixa, média, e alta porosidade, perante

tipos de solo, condições do ambiente, suscetibilidade à erosão. Ainda, é possível perceber que tipos de uso ou presença de feições erosivas estariam associados a cada intervalo.

Parte-se da concepção de Grohmann (1975) de que a porosidade varia entre 40 e 60%, no que o autor chama de “condições naturais” do solo, considerando o alcance de 30% e 80% de PT como valores extremos. Kiehl (1979) diferencia a PT de acordo com a textura, podendo variar de 35 a 50% quando os solos são arenosos e de 40 a 55% se são argilosos. Ao considerar ambos os autores, Lima (2008) definiu classes de suscetibilidade à erosão, de acordo com os resultados de PT na bacia do rio Macaé. Este definiu que entre 35 e 40% há baixa porosidade e alta suscetibilidade, entre 40 e 55% porosidade e suscetibilidade são médias, e que a partir de 55% há alta porosidade e baixa suscetibilidade erosiva. Neste aspecto da classificação pela suscetibilidade, Rangel e Guerra (2014) consideraram, para condições específicas encontradas em trilhas da Reserva Ecológica da Juatinga (Paraty-RJ) – areia fina maior que 9%; silte maior que 20%, argila menor que 5% e MOS menor que 1% – que baixa porosidade/alta suscetibilidade ocorre com PT abaixo de 35%, média porosidade/suscetibilidade com PT entre 35 e 45%, e alta porosidade/baixa suscetibilidade a partir de 45%.

Três dos estudos citados contaram com análises de solo de áreas florestadas (LOUREIRO, 2010; NEVES, 2011; RANGEL e GUERRA, 2017). Enquanto Neves (2011) registrou PT entre 51 e 54% para áreas que chamou de não degradadas, Loureiro (2010), ao estudar a sub-bacia do rio das Flores (Nova Friburgo-RJ), verificou PT entre 53 e 78% em áreas de floresta clímax, ou em estágio avançado de sucessão ecológica. Ou seja, o último valor foi muito próximo do extremo definido por Grohmann (1975). Já Rangel e Guerra (2017), na bacia do córrego dos Micos, obtiveram variações de PT entre 62 e 66% em áreas de floresta. Estes dados revelam que para PT abaixo de 51% nenhum ambiente era de floresta.

Partindo deste valor, na figura 34 (página 146), a primeira feição erosiva que surge possui 51% de porosidade, neste caso, o ponto BPD (0-10 cm) da presente pesquisa. Temos um valor que poderia ser definido, aproximadamente, como limiar entre porosidades mais e menos críticas. Corrobora esta ideia de porosidade mais crítica abaixo de 50% o fato de que feições erosivas graves (NEVES, 2011; LOUREIRO, 2013) ou condições de solo mais vulnerável (CARDOSO DA SILVA e GUERRA, 2015; PEREIRA *et al.*, 2016), incluída a presente pesquisa,

encontram-se com PT de 30 a 51%. Neves (2011) analisou áreas degradadas por erosão laminar e linear, com PT de 38 a 50%. Loureiro (2013), em encosta com voçorocamento, obteve PT entre 34 e 45%. Cardoso da Silva e Guerra (2015) analisaram solos nos leitos da estrada Paraty-Cunha, antes de ser pavimentada, ou seja, área com alta compactação do solo, que apresentou PT entre 30 e 45%, com o valor mais baixo correspondendo ao extremo citado por Grohmamm (1975). Enquanto que Pereira *et al.* (2016) monitoraram parcelas de erosão com solo exposto e compactado, com PT entre 33 e 43%.

Assim, com base nesses dados e no esquema, seria possível propor que solos de baixa porosidade registram PT de 30 a 45%; de média, PT de 45 a 55%; e de alta porosidade, PT acima de 55%. Logo, as amostras de “P” e “S” seriam de baixa e média porosidade total.

Sobre a estabilidade de agregados, Pereira e Thomaz (2014) afirmam que valores de DMP maiores que 2 mm, em áreas de pasto, expressam que as raízes das gramíneas são eficazes em conferir estabilidade aos agregados, no caso da camada superficial do solo. Essa eficácia se dá física e quimicamente, pela ação mecânica de sustentação, que reúne os agregados, e pela liberação de fluidos orgânicos, que possuem funções cimentantes (TISDALL e OADES, 1982; PEREIRA e THOMAZ, 2014). Estes últimos verificaram que em profundidade, porém, devido à menor presença de raízes, há redução nos valores de DMP, que em seus estudos foi de 20% entre as camadas de 0-5 e 5-15 cm.

Por esses argumentos, fica clara a influência das raízes na profundidade de 0-10 cm em área de pasto pesquisada por Rangel e Guerra (2017), na bacia do Córrego dos Micos (Paraty-RJ). Nesta profundidade superficial, o solo do pasto se comporta de maneira semelhante ao solo da área de floresta. Já em 10-20 cm o comportamento do solo no pasto se assemelha ao solo de área cultivada com aipim (RANGEL e GUERRA, 2017). Isto reforça a ideia de que as raízes das gramíneas não desempenham a mesma função que em 0-10 cm.

Além da questão sobre as raízes, outro fator relevante que explica tal redução dos valores de DMP em Pereira e Thomaz (2014) é a queda dos teores de MOS, à medida que aumenta a profundidade do solo amostrado (LIMA *et al.*, 2003 *in* PEREIRA e THOMAZ, 2014). Nesse sentido, Netto *et al.* (2001), Avanzi *et al.* (2011) e Donagemma *et al.* (2011) também encontraram esse padrão de diminuição dos índices DMP, DMG e IEA com o aumento da profundidade. Donagemma *et al.* (2011) utilizaram blocos de amostra de 0-20 e 20-40 cm.

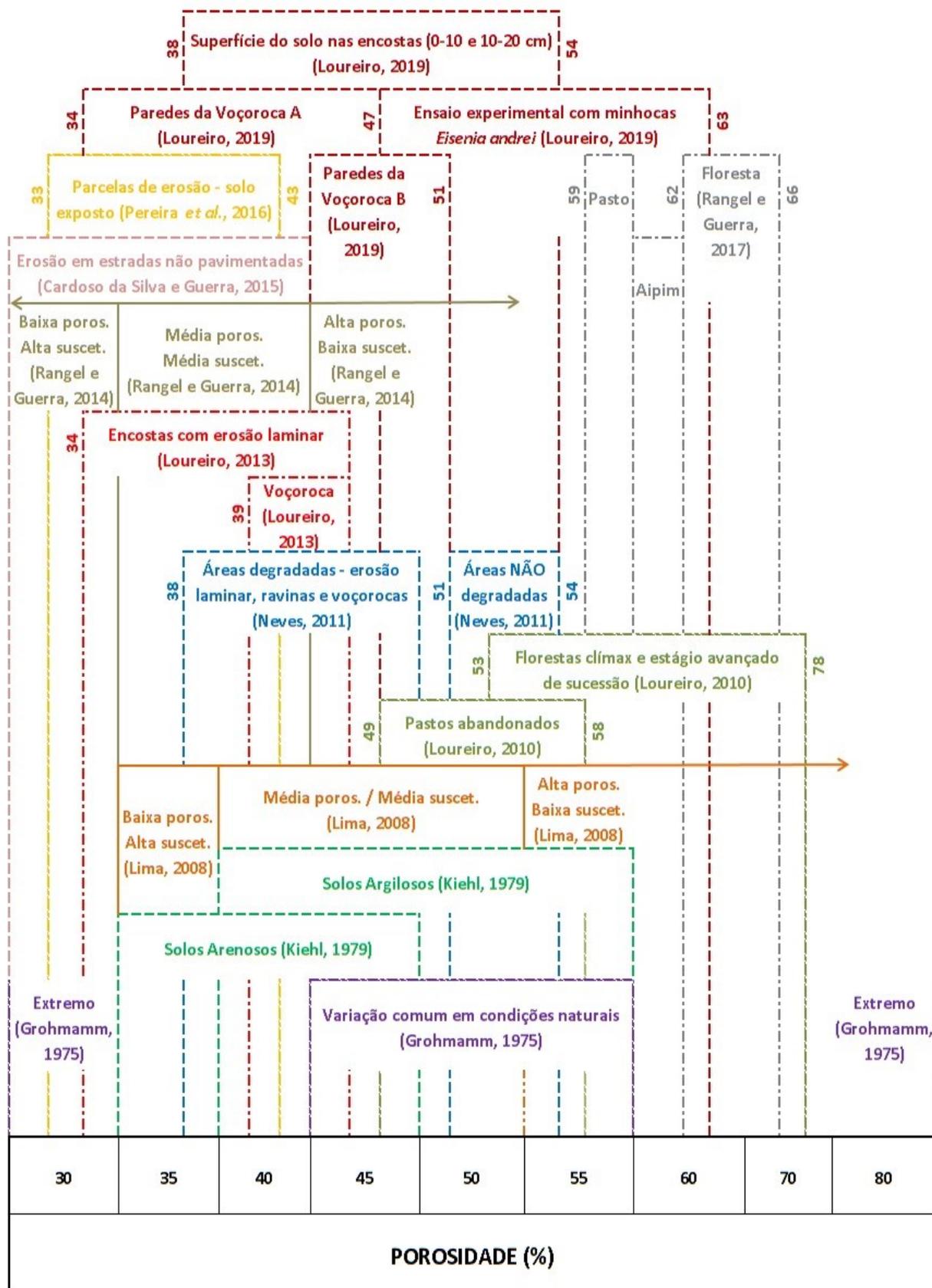


Figura 34 – Esquematisação de diferentes intervalos de porosidade total (PT), de acordo com diferentes estudos citados, mostrando a variação da porosidade do solo em diferentes condições e ambientes. No topo “Loureiro, 2019” refere-se a presente tese. Organização: Hugo Alves S. Loureiro.

Esse comportamento pode ser verificado na presente pesquisa, para blocos de amostras de 0-10 e 10-20 cm (tabela 8). Pois, para AS1 e QS1, nos três índices, e para BS1, em dois, houve redução dos valores com a profundidade. Única exceção é o IEA do ponto BS1, que foi 0,68% maior na profundidade 10-20 cm que em 0-10 cm. Mas é importante observar que as quedas dos índices de agregação foram maiores nos pontos AS1 e QS1. Os maiores IEA foram registrados em BS1. Ou seja, este ponto possui maior estabilidade de agregados que os pontos da área de estudo A. Este fato vem somar à hipótese levantada anteriormente, de que há maior erodibilidade no local A em relação ao local B.

Ao relacionar o IEA e teores de carbono orgânico, Brizzi *et al.* (2018) mostraram uma relação diretamente proporcional. Os autores analisaram solos em áreas de floresta, cultivo e pasto, na bacia do rio São Romão (Nova Friburgo-RJ), encontrando neste último os menores índices de estabilidade de agregados e, conseqüentemente, menores teores de carbono orgânico. Na presente pesquisa, os pontos AS1 e QS1 possuem teor de MOS de 3,61% e 3,55% para 0-10 cm de profundidade, com IEA de 95,23% e 97,32%, respectivamente. BS1 possui 5,90% de MOS e IEA de 97,39. Para a profundidade de 10-20 cm, os teores de MOS são de 3,02% em AS1; 3,08% em QS1 e 2,12% em BS1, com IEA de 88,15%, 89,55% e 98,07%, respectivamente.

Portanto, estes resultados não apresentaram padrão semelhante aos de Brizzi *et al.* (2018). Ainda que seja este observado em 0-10 cm, a diferença de IEA é pequena, apenas 0,07% maior para BS1, que possui 2,35% a mais de matéria orgânica. Já na camada 10-20 cm o padrão, de fato, não se repete. Pois, há menor MOS (0,96% menos) e maior IEA (8,52% a mais) em BS1.

Tabela 8 – Resultados das análises de Estabilidade de Agregados, segundo adaptações de Yoder (1936) por Cesário *et al.* (2010), Donagemma *et al.* (2011) e Rangel (2014).

	Profundidade de 0-10 cm			Profundidade de 10-20 cm		
	AS1	QS1	BS1	AS1	QS1	BS1
DMP (mm)	2,57	2,58	2,76	1,97	1,53	2,69
DMG (mm)	2,12	2,26	2,50	1,04	1,06	2,43
IEA (%)	95,23	97,32	97,39	88,15	89,55	98,07
Macroagregados (%)	95,23	97,32	97,39	88,15	89,55	98,07
Microagregados (%)	4,77	2,68	2,61	11,85	10,45	1,93
Agregados > 2 mm (%)	80,75	78,73	87,75	55,74	29,72	83,29

**AS** – superficial na voçoroca A; **QS** – superficial na voçoroca Q; **BS** – superficial na voçoroca B; **Bi** – no interior da voçoroca B.

Sobre os índices DMP e DMG, Castro Filho *et al.* (1998) concluíram que quanto maiores os teores de carbono orgânico, maiores foram os seus valores, principalmente na camada 0-10 cm. Concluíram, também, que o aumento nos teores de material orgânico melhorou os índices de agregação, pois a proporção de microagregados (< 0,25 mm) foi reduzida, aumentando a presença dos macroagregados (> 0,25 mm). Mais uma vez, os resultados do presente estudo respondem de acordo às conclusões de Castro Filho *et al.* (1998), apenas no que concerne à camada de 0-10 cm. Isto, por que, na camada 10-20 cm, BS1 possui menor teor de MOS com DMP e DMG bem maiores que AS1 e QS1.

Santos (2017) identificou como contribuição à estabilidade de agregados a presença de altos teores de MOS (a partir de 5,87%), compensando baixos teores de argila (30 a 168 g/kg), nos pontos de pastagem P2, P4 e P5. Nestes, o referido autor encontrou os seguintes valores: DMP entre 2,75 e 2,79 mm; DMG entre 2,46 e 2,61 mm, IEA acima de 95,85%; com 87,81 a 89,02% de agregados maiores que 2,0 mm; sendo mais de 97,75% de macroagregados e menos de 2,25% de microagregados. Neves *et al.* (2015) também encontraram correlação positiva entre DMP e MOS em áreas de pasto. Nos pontos P1, P7 e P10, os valores mais altos de DMP corresponderam a teores de MOS acima de 6,0%.

De modo semelhante a Santos (2017), o ponto BS1 possui alto teor de MOS (5,90%) e baixo teor de argila (190 g/kg), na camada superficial. Isto significa que BS1 (0-10 cm) é

favorecido, ao possuir teor de matéria orgânica capaz de conferir cimentação suficiente para estruturar bem o solo, trazendo estabilidade aos agregados, apesar de certa deficiência no teor de argila. Assim, os valores de DMP (2,76 mm), DMG (2,50 mm), IEA (97,39%), agregados maiores que 2,0 mm (87,75%), macroagregados (97,39%) e microagregados (2,61%) são correspondentes aos intervalos verificados por Santos (2017). Já os pontos AS1 e QS1 possuem teores de matéria orgânica até 0,11% acima do limite de 3,50% entre alto e baixo teor de MOS (MORGAN, 2005) e teores médios de argila (entre 291 e 319 g/kg).

## **5.2. MONITORAMENTO: DE ESTACAS E PINOS AO USO DE GEOTECNOLOGIAS**

As técnicas que utilizam estacas e pinos para monitorar diferentes formas de erosão têm importância reconhecida na literatura (FULLEN e CATT, 2004; GUERRA, 2005b; LAWLER, 2005; MORGAN, 2005; LOUREIRO, 2013; TEDESCO, 2015; PLENNER *et al.*, 2016; ETCHELAR, 2017; NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018). Permanecem necessárias e assim deverão se manter por bastante tempo, devido a suas qualidades. Entre elas: custo muito baixo, facilidade de utilização e representam uma técnica em escala de detalhe em campo (GUERRA, 2005b; 2016; SOLÉ-BENET *et al.*, 2012; LOUREIRO, 2013; ETCHELAR, 2017). Contudo, o avanço tecnológico tem trazido, cada vez mais, possibilidades de uso de técnicas que conseguem obter dados mais precisos e geração de modelos digitais 3D, que enriquecem as análises da dinâmica erosiva (BONILLA, 2008; SOLÉ-BENET *et al.*, 2012; CASTILLO e GOMEZ, 2016; GOODWIN *et al.*, 2016; KRENZ e KUHN, 2018; NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018; GARRITANO *et al.*, 2018a,b; GARRITANO *et al.*, 2019).

Além disso, muitas vezes essas técnicas manuais tradicionais não são possíveis de serem aplicadas, como foi o caso nesta pesquisa, em razão das dimensões das paredes, sem possibilidade de uso de técnicas de rapel, e da acessibilidade de alguns trechos das bordas. Ou ainda, há a questão de que tais técnicas não comportam a totalidade da área monitorada, humanamente inviável de realizar a leitura de cada milímetro da feição erosiva com absoluta precisão (VINCE *et al.*, 2015; PLENNER *et al.*, 2016; KRENZ e KUHN, 2018).

De modo algum isto significa negar ou recusar o uso dessas técnicas. Julga-se que são importantes, por exemplo, para que proprietários e gestores públicos de pequenas cidades

sem muitos recursos, possam estimar quanto de solo está sendo perdido em suas terras, bem como podem ser utilizadas didaticamente para ensinar sobre erosão, conservação do solo e da água, ou educação ambiental em geral a diversos públicos alvo. Em outras palavras, estacas e pinos de erosão, seja em superfície ou nas paredes de ravinas e voçorocas, servem para dimensionar situações erosivas, mostrando por que se deve cuidar dos solos e dar atenção à ocorrência de processos erosivos.

Nesse sentido, Loureiro (2013) monitorou o avanço da erosão em pequena voçoroca, que se mostrou bastante didática, para a compreensão da dinâmica erosiva no sopé do Pico do Frade, que se destaca na paisagem da Serra Macaense, no distrito de Glicério (Macaé-RJ). Com pinos de erosão utilizados nas paredes da voçoroca – método inovador em termos de Brasil, e muito pouco utilizado internacionalmente, que resgata aplicação de Ireland *et al.* (1939), pioneiro no estudo de voçorocas (CASTILLO e GOMEZ, 2016) – foi possível obter estimativas do quanto de solo foi erodido durante um ano de estudos. O monitoramento resultou num modelo geométrico para quantificar o solo perdido (figura 35). Com base neste e suas medições, foi registrada a estimativa mínima de 2,49 toneladas de solo erodido, numa área de 245 m<sup>2</sup>, ou 0,025 hectares, cuja extrapolação para um hectare seria equivalente à perda de 100 t·ha<sup>-1</sup> (LOUREIRO, 2013). Comparativamente, vale lembrar que o Limite de Tolerância de Perda de Solo é de 2 t·ha<sup>-1</sup>·ano (MORGAN, 2005).

Nadal-Romero e García-Ruiz (2018) afirmam que uma limitação do método de pinos de erosão é a possibilidade de gerar dados incorretos. Entre as razões estariam: baixa resolução espacial; alterações ou distúrbios na estabilidade do solo na parede ou margem de rios; até mesmo a experiência do operador (SOLÉ-BENET *et al.*, 2012; PLENNER *et al.*, 2016). Além disso, existe a possibilidade dos pinos de erosão serem removidos durante o processo erosivo, seja em voçorocas (LOUREIRO, 2013), ou margens de rios (PLENNER *et al.*, 2016).

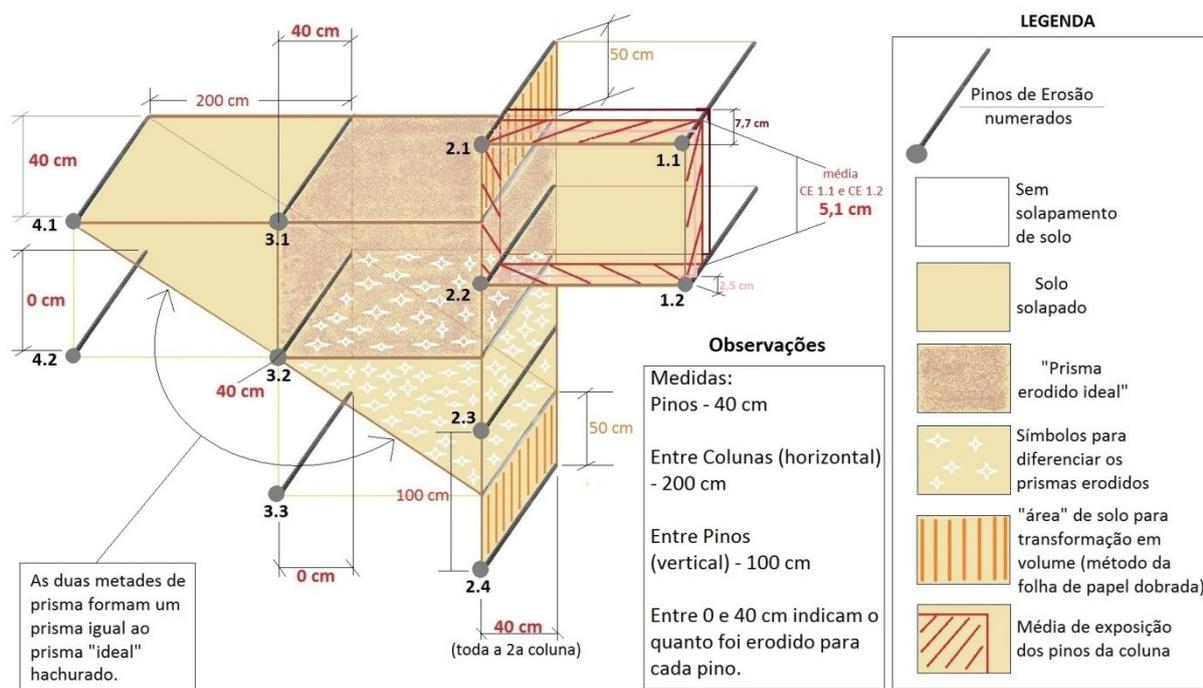


Figura 35 – Modelo esquemático para cálculo da perda de solo na alcova de regressão de feição erosiva em Macaé (RJ). Adaptado de Loureiro (2013).

Vince *et al.* (2015) relatam menor precisão deste método manual. Verificaram uma superestimação de volume em ravinas através desta técnica, frente ao modelo digital de elevação obtido por *Laser Scanner* Terrestre, ainda que tenha havido entre ambas as técnicas "boa correspondência", em termos de forma e dimensão das seções que analisaram. Por outro lado, em termos geométricos, estes autores destacam que o método com pinos subestima a realidade da feição, por não considerar suas sinuosidades, característica captada pelo LST. Ainda, de acordo com Boardman *et al.* (2015) e Krenz e Kuhn (2018), esse tipo de medida pontual, como é o método dos pinos de erosão, permite taxas de erosão apenas razoáveis e para pequenas áreas.

De fato, estas são situações verificadas por Loureiro (2013), que observou a impossibilidade de uma medida morfologicamente perfeita através dos pinos, ao afirmar que os dados obtidos com este tipo de monitoramento caracterizam estimativas subestimadas – porém úteis – do volume erodido. A distribuição dos pinos nas paredes de voçorocas, em análise conjunta, como um *grid* (grade) de pinos, leva a tais estimativas, ao considerar o que foi chamado pelo autor de "prisma erodido". Em outras palavras, o método

dos pinos possibilita medições geométricas, de acordo com a disposição dos pinos, mas não medições morfológicas, que considerem toda a rugosidade das paredes. Para medir essa morfologia das paredes é necessário que haja densa nuvem de pontos, como as que podem ser geradas por LiDAR, em especial LST, ou por câmeras em VANTs específicos, capazes de realizar sensoriamento remoto e modelagem do terreno em escala de detalhe.

Justamente essa alta densidade de pontos e detalhamento é que conferem elevado potencial a estas geotecnologias citadas. Nesse sentido, o LST permite maior precisão na análise da variabilidade espacial do recuo nas paredes e margens como um todo contínuo (PLENNER *et al.*, 2016), demandando tempo e esforços menores em relação às medidas manuais em campo. Outra vantagem no uso do LST é sua capacidade de personalização, de acordo com objetivos de pesquisa e acessibilidade em campo (PLENNER *et al.*, 2016; NADAL-ROMERO e GARCÍA-RUIZ, 2018). Por isso, o LST é mais apropriado que o *Laser Scanner Aerotransportado (LSA)*, realizado com aviões tripulados, pipas e dirigíveis, porque realiza varreduras em escalas de maior detalhe, como a escala da encosta. A densidade da nuvem de pontos do escâner terrestre é notadamente maior, com informações mais detalhadas (PERROY *et al.*, 2010; PRETI *et al.*, 2013; GOODWIN *et al.*, 2016). Perroy *et al.* (2010), por exemplo, compararam MDTs gerados por varreduras com LSA e LST. Estes autores registraram que a resolução espacial foi de 1,5 m para o MDT do LSA e de 0,25 m para o MDT do LST (PERROY *et al.*, 2010). Estes mesmos autores indicam, ainda, que voçorocas profundas podem representar dificuldade maior quanto à coleta contínua dos dados, julgando que, neste caso, o uso de LSA seria apropriado.

Contudo, deve-se contrapor que há alternativa ainda melhor ao LSA. A aquisição de imagens a partir de VANTs é vantajosa, quando não há acessibilidade fácil, ou segurança suficiente a determinadas áreas em estudo, sob condições que impeçam os melhores usos do LST (NAVES SILVA *et al.* 2015; GARRITANO *et al.*, 2018a,b; KRENZ e KUHN, 2018).

Se por um lado as sinuosidades das feições erosivas não são captadas pelo método dos pinos, conforme mencionaram Vince *et al.* (2015), por outro, Krenz e Kuhn (2018) abordam o fato de a dissecação das feições ser um complicador ao mapeamento terrestre da área em estudo. Isto leva à necessidade de mudanças na posição do LST, a fim de recuperar seu campo de visão frente às obstruções existentes (KRENZ e KUHN, 2018). Caso

realizar essas mudanças de posicionamento seja um fator complicador, uma alternativa é a utilização de VANTs.

Marzolf e Poesen (2009) já indicavam o uso de fotografias aéreas digitais de alta resolução possibilitando estudos de detalhe sobre voçorocas. Nesse sentido, Daba *et al.* (2003 *in* TEDESCO, 2015) recomendaram que o mapeamento de voçorocas, com geração de MDT e fotointerpretação, utilizasse fotografias aéreas em escalas maiores que 1:10.000. Os VANTs, portanto, realizam esta recomendação com facilidade, diferentemente de satélites e sensores. A figura 36 compara uma imagem de alta resolução disponível no *Google Earth*, datada de 2017, com alguma distorção devido à posição do satélite, sua escala possível e pelo “zoom” aplicado na imagem, com uma foto aérea obtida com o VANT modelo DJI Spark, em março de 2018, sendo esta claramente mais nítida.

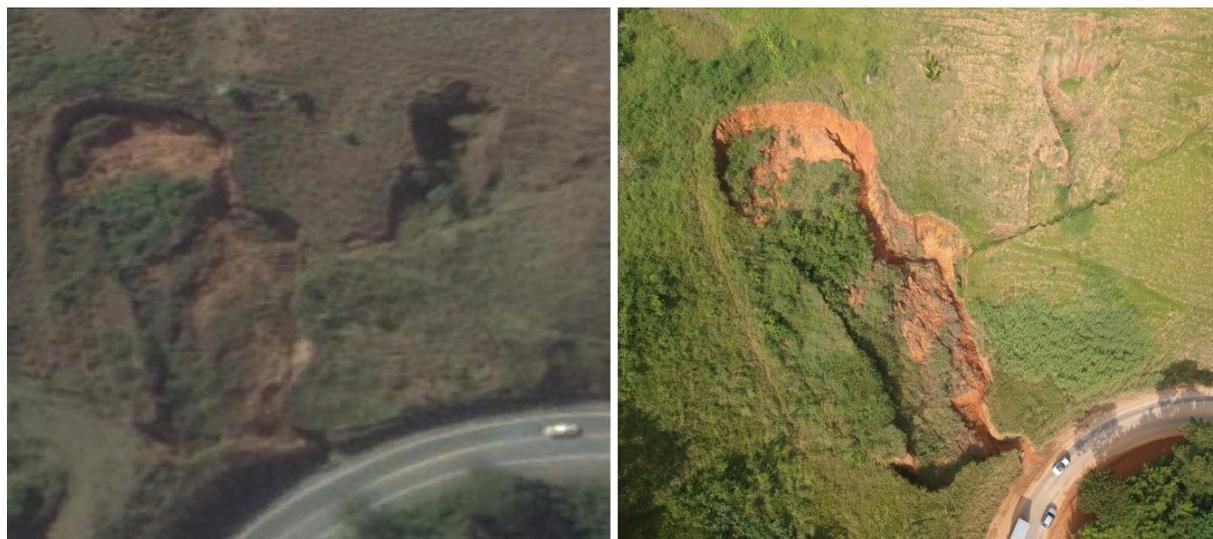


Figura 36 – Comparação da qualidade entre uma imagem de alta resolução espacial disponível no *Google Earth* e uma foto aérea registrada com VANT, para a área de estudo A. Foto: Fabrizio Garritano (2018).

Imagens de satélite de média resolução espacial são insuficientes para monitorar voçorocas, ficando limitadas à sua localização, enquanto imagens de alta resolução espacial permitem, além da localização, a delimitação de voçorocas (SANTOS e FARIA, 2011 *in* TEDESCO, 2015). Ainda que permitam monitorar a dinâmica erosiva em termos de área da feição, mesmo estas imagens de alta resolução, como dos sensores *Ikonos*, *QuickBird*,

*RapidEye* e *GeoEye*, por exemplo, não são capazes de alcançar precisão suficiente, na casa dos centímetros e milímetros, para que seja realizado o monitoramento das voçorocas em termos de volume de solo erodido ou, mais precisamente, com relação à sua morfologia interna e os subprocessos do voçorocamento.

Se tanto o LST quanto o VANT são geotecnologias de detalhe extremamente úteis aos estudos geomorfológicos, o que as diferencia em termos de resultados e sua análise? Uma das respostas está presente na conclusão de Krenz e Kuhn (2018), segundo os quais imagens de alta resolução e precisão obtidas por VANTs diminuem “a distância entre o nível de escala do satélite e as nuvens de pontos LiDAR de alta resolução”, que não são capazes de abranger grandes áreas. Em outras palavras, as imagens de alta resolução e precisão produzidas pelos VANTs representam um recorte intermediário entre as imagens de satélites e os produtos de escaneamento a *laser* terrestre, com alto nível de detalhe.

Mas os VANTs, tal qual técnicas de varredura terrestre a *laser*, também podem gerar imagens com precisão de milímetros e centímetros, diferenciando-se pela possibilidade de alcançarem pontos mais difíceis ou inacessíveis das áreas analisadas, com menor dispêndio de esforço em campo (KRENNZ e KUHN, 2018). Ou seja, o LST é um ótimo método para o monitoramento da erosão linear, porém, muito sujeito às condições de campo, conforme ocorrido nesta pesquisa. Lembrando que tanto o grande volume de chuva anterior à chegada ao campo, quanto sua ocorrência durante o trabalho de campo, inviabilizaram entrar na voçoroca e realizar maior número de varreduras em diferentes pontos da área.

As experiências obtidas nesta tese e, em decorrência de sua pesquisa, nos trabalhos de Garritano *et al.* (2018a; 2018b) também perfazem outros indicativos de resposta àquela pergunta. O VANT é um instrumento que pode produzir imagens aéreas e produtos derivados, como modelagem 3D e mapas de hipsometria e exposição/cobertura do solo (D’OLEIRE-OLTMANN *et al.*, 2012; PEREZ e GARCIA, 2017; GARRITANO *et al.*, 2018a,b; GARRITANO *et al.*, 2019; KRENNZ e KUHN, 2018), como exemplifica a figura 37.

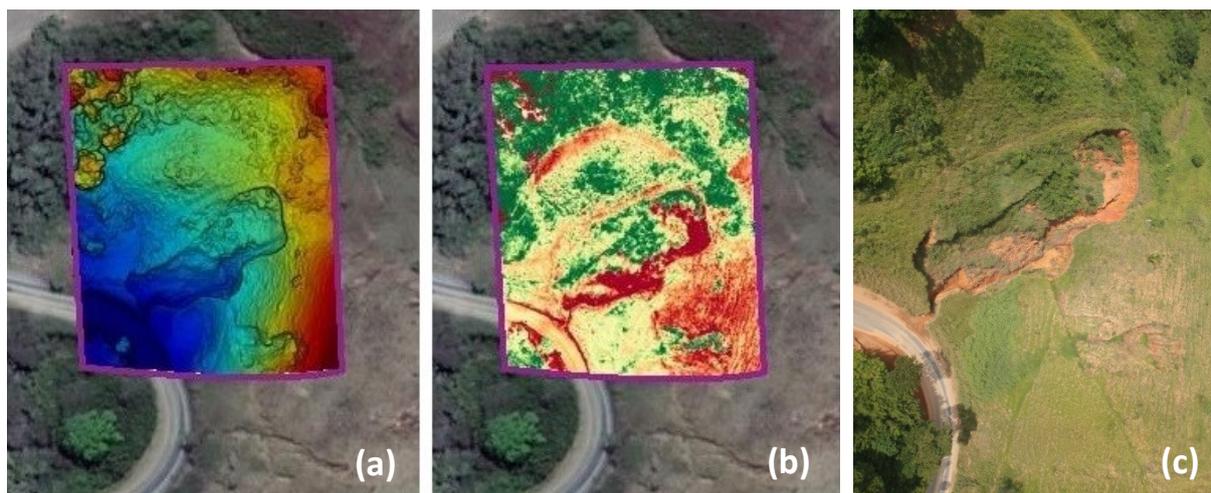


Figura 37 – Mapeamentos de (a) hipsometria e (b) exposição/cobertura do solo, de Garritano *et al.* (2018a), a partir de imagens do VANT DJI MAVIC PRO 2018; e (c) fotografia aérea simples obtida para esta pesquisa, com o VANT DJI Spark. Foto: Fabrizio Garritano (2018).

O *Laser Scanner*, em sua versão Terrestre, registra outros ângulos de visada, mapeando formas e objetos através de milhões de pontos com coordenadas tridimensionais, gerando sua representação virtual – para além da geração de fotografias aéreas como os VANTs – (BONILLA, 2008; SOLÉ-BENET *et al.*, 2012; PRETI *et al.*, 2013; VINCE *et al.*, 2015; ETCHELAR, 2017) que, a princípio, possui maior opção de manuseio dentro de seu ambiente de processamento (figura 38). É como se a nuvem de pontos do LST permitisse maior variação nas escalas de visualização e trabalho dentro do *software*, durante o processamento dos dados, do que a imagem produzida a partir de diversas sobreposições laterais do voo do VANT (GARRITANO *et al.*, 2018a; 2018b; GARRITANO *et al.*, 2019). Quer dizer, a nuvem de pontos do LST permitiria ter visadas mais próximas do conjunto de pontos sem prejuízo de precisão, enquanto as imagens do VANT permitiriam esse “zoom” até um certo limite inferior ao da nuvem de pontos.

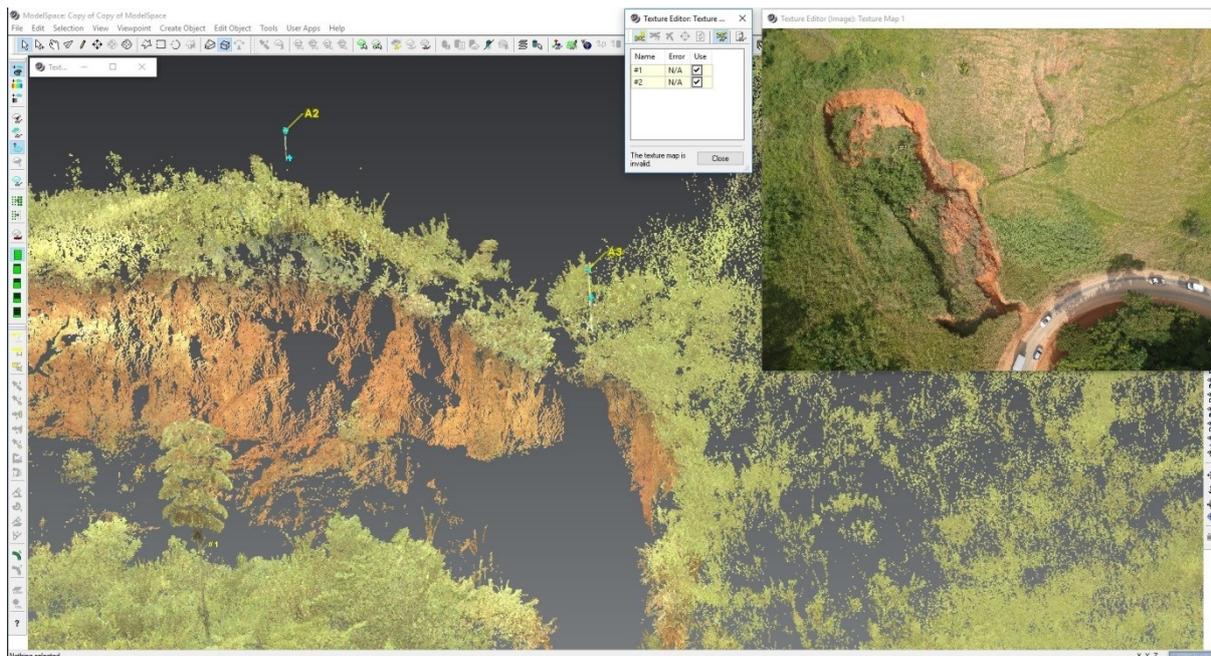


Figura 38 – Manuseio da nuvem de pontos do LST no *software Leica Cyclone*. No detalhe, foto aérea do VANT utilizada no processamento. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018). Foto aérea: Fabrizio Garritano (2018).

Ainda assim, Eltner *et al.* (2015), ao mapearem ravinas em parcelas de erosão, comparando o uso de LST e VANT, indicaram que as imagens produzidas por VANTs são compatíveis aos produtos do LST. Isto ocorreu porque verificaram que a precisão dos Modelos Digitais de Superfície, a partir das imagens do VANT, estava de acordo com a precisão de 1 cm do LST. Este, por sua vez, já vem sendo utilizado com certa frequência na medição da erosão por voçorocas, por causa dessa alta precisão. Nesse aspecto, VANTs e LST se diferenciam não enquanto resultado ou análise em si, mas devido à elevada rapidez com que a coleta dos dados é feita pelo VANT, comparado ao LST (NEUGIRG *et al.*, 2016;).

Portanto, técnicas de LiDAR, como o LST, ainda consomem tempo e muito trabalho durante a coleta e o processamento dos dados (TEDESCO, 2015; KRENZ e KUHN, 2018). Além disso, os *softwares* podem ser caros (PLENNER *et al.* 2016), ou não adequados a análises geomorfológicas, mantendo esta etapa como um dos desafios no uso do LST (BONILLA, 2008). Assim, este último autor considera que o trabalho com LST seja desafiador no que tange o processamento de dados e que lições aprendidas em sua pesquisa são de ajuda fundamental para desenvolver melhores práticas para estudos futuros. Esta análise é corroborada pelos resultados do presente estudo.

Apesar de toda a capacidade de alta precisão, Krenz e Kuhn (2018) ressaltam que os volumes verificados nestes métodos devem ser considerados “boas estimativas” e não valores absolutamente precisos, pois ainda há elementos que desafiam a exatidão dos dados. Nesta pesquisa esses elementos resultam, por exemplo, do sombreamento de alguns pontos. Como houve áreas não varridas, conseqüentemente, não há precisão fiel à realidade, pois são geradas imperfeições no modelo, produzindo erros que necessitam de remoção manual, não automática (figura 39).



Figura 39 – A imagem da direita é o resultado do processo que calcula volumes a partir do modelo TIN (ao centro), derivado da Ortoimagem (à esquerda). Nesta os “vazios” resultam de pontos não escaneados. Estes geram imprecisão no modelo TIN, que os preenche.

Da maneira como as técnicas puderam ser empregadas nesta pesquisa, em caráter de experimentação, o escaneamento a laser terrestre (*terrestrial laser scanning*) se destacou. Porque foi aquela que, visual e analiticamente, trouxe o maior potencial de resultados. Em outras palavras, o *laser scanner* proporcionou um tratamento em ambiente digital que as imagens obtidas pelo modelo de VANT utilizado não permitiram (diferentes pontos de visada, cálculos de área, volume e seções, além de gerar de curvas de nível e hipsometria – figura 40). Contudo, houve elevada demanda de tempo e trabalho, em função do desconhecimento teórico e prático para processar os dados escaneados nos *softwares* necessários. Desse modo foi preciso recorrer a vídeos tutoriais no portal YouTube.

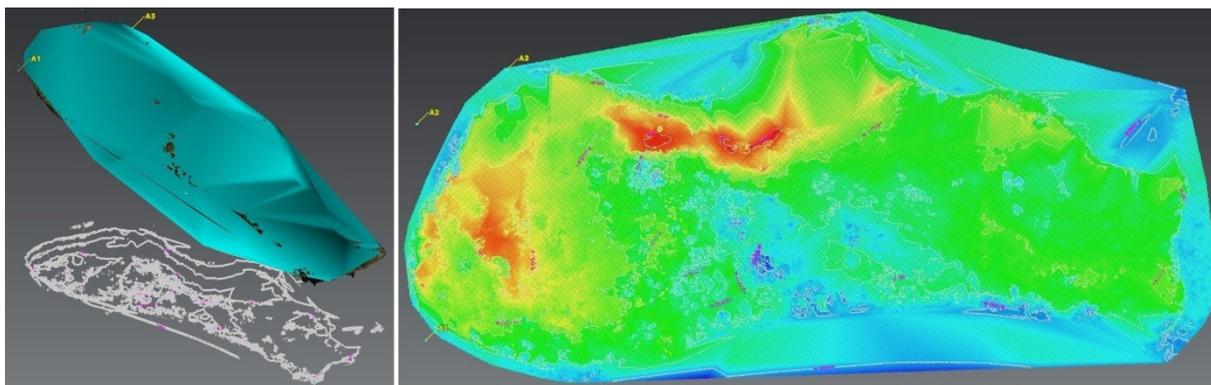


Figura 40 – Etapas finais de processamento dos modelos com recorte da voçoroca A, extraíndo curvas de nível e gerando sua hipsometria.

Ainda assim, as imagens obtidas com VANT tiveram importância fundamental nesta pesquisa. Primeiro, devido à alta definição e escala de detalhe, ao compor o ambiente de processamento dos dados do LST no *software Cyclone*. Pois, partindo de uma imagem oriunda do VANT foi possível realizar as marcações necessárias de pontos comuns (mínimo de sete que sejam válidos) entre a fotografia aérea e a nuvem de pontos do escaneamento, para a geração de produtos e dados deste último (figuras 41 e 42). Por fim, através de análises comparativas com as imagens de satélite do *software Google Earth* e do Ortofotomosaico do IBGE, também devido à escala de maior detalhe permitida pelo uso do VANT, além de serem mais atuais.

A figura 42 também possibilita verificar diversos “vazios” na imagem formada pela nuvem de pontos do LST. Isto reflete o quão importante são os posicionamentos diversificados dos escaneamentos e suas configurações (GOODWIN *et al.*, 2016). Representam grandes oclusões resultantes da impossibilidade de realizar mais do que três varreduras e de acessar o interior da feição erosiva com o equipamento. Ao escanear voçorocas profundas, Perroy *et al.* (2010) também registraram problemas de oclusão significantes. Bonilla (2008) já afirmava que a eliminação de sombras e obstruções quaisquer demandavam diferentes posicionamentos de varredura.

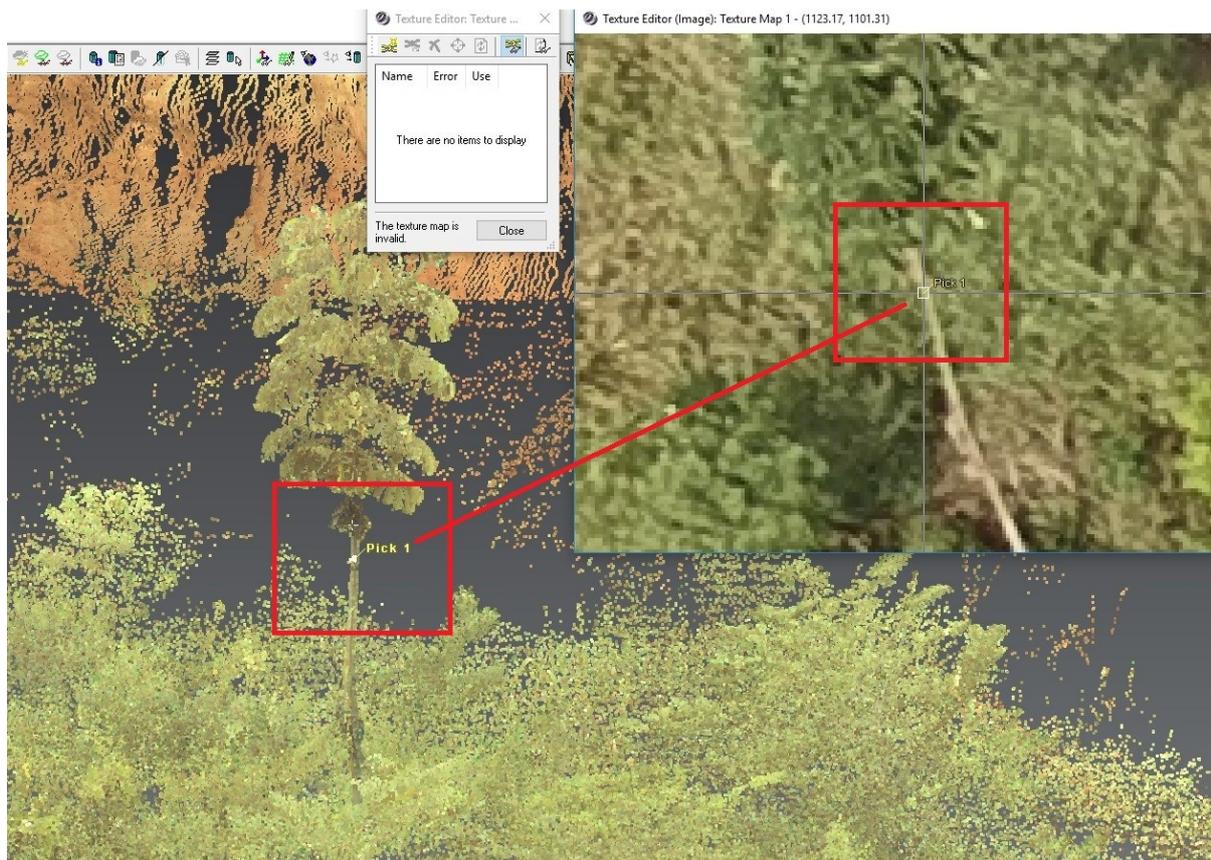


Figura 41 – Marcação do ponto comum nº 1 (*Pick 1*) na nuvem de pontos do LST e na imagem do VANT (no detalhe), no *software Cyclone*, para refinamento dos dados do escaneados.

Ramos (2010 *in* ETCHELAR, 2017) utilizou LST para gerar, a partir da nuvem de pontos, um MDE de alta resolução espacial, obtendo área, volume e curvas de nível de uma voçoroca. Com as curvas de nível no *ArcGIS* obteve, na ferramenta *Hydrology*, a direção e o acúmulo de fluxo (pluviométrico) (*flow direction* e *flow accumulation*), possibilitando verificar maior e menor suscetibilidade à erosão de determinadas áreas da voçoroca. Na presente pesquisa, apesar do mesmo intuito e da geração de curvas de nível, não foi possível realizar tal procedimento, porque não foi descoberto (até aqui) como realizar a extração dessas curvas de nível do *software Leica Cyclone* e em extensão compatível com seu uso no *software ArcGIS*. Este é um tipo de resultado gerado pelo caráter experimental deste estudo. Aprimorar tal resultado se coloca, pois, como objetivo para futuros trabalhos.

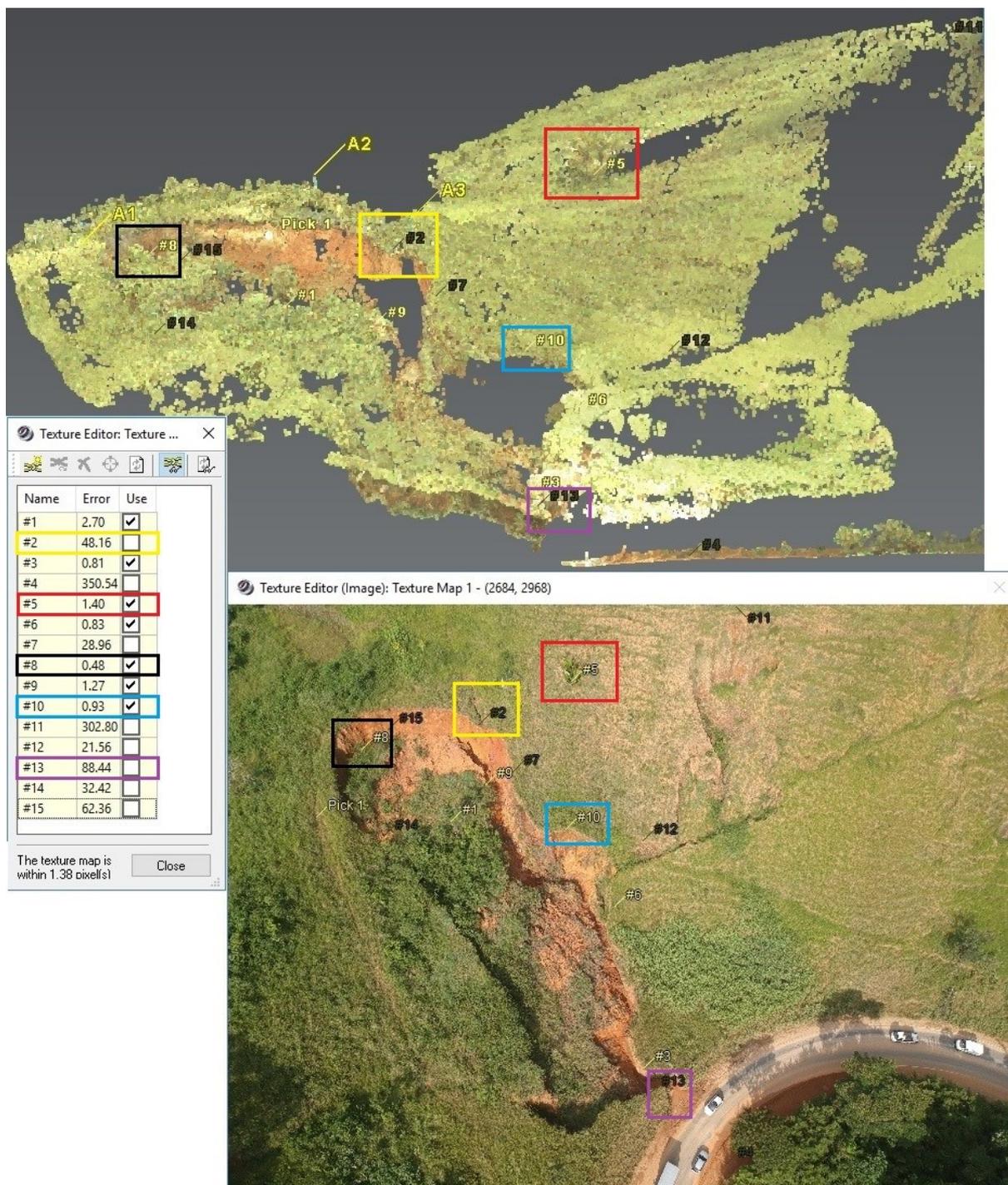


Figura 42 – Processamento da nuvem de pontos do *Laser Scanner* Terrestre (varredura em 02/2018) com auxílio de imagem obtida com VANT (em 03/2018). Com fonte amarela e *check* (v) estão pontos de menor erro de precisão, que definem os pixels do mapa de textura. Exemplos: números 5 (vermelho), 8 (preto) e 10 (azul). Com fonte preta nas imagens e sem *check* (v) na tabela estão pontos de erros grosseiros, que invalidam o mapa de textura se acionados – com *check* (v) – na tabela. Exemplos: números 2 (amarelo) e 13 (roxo). Foto do VANT: Fabrizio Garritano (2018). Processamento e edição: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Esta dificuldade em exportar conteúdo de um *software* específico, como o de processamento do LST, não é exclusividade desta pesquisa. Krenz e Kuhn (2018) realizaram a comparação entre um MDT interpolado em ambiente GIS, produzido a partir de imagem de satélite de alta resolução, e um MDT produzido através de imagens obtidas com VANT. Eles desejavam obter estimativas de volume nas chamadas *badlands*, o que somente foi possível pelo MDT do VANT, devido a sua capacidade de representação em alta resolução. Porém, estes autores reforçam que não puderam estimar o volume através do ArcGIS, para que pudessem compará-lo ao produto do *software* de tratamento das imagens do VANT, porque seria muito demorado, necessitando várias etapas de trabalho.

Pode-se afirmar que o uso de geotecnologias para monitoramento, diagnóstico e prognóstico da erosão é uma via de mão dupla. Ampliam a compreensão dos processos, permitindo novas escalas e maior precisão; e trazem novos desafios de operacionalização, processamento e análise de dados, desenvolvimento de pesquisas, pesquisadores e dos próprios equipamentos. Controlar voçorocas é difícil e oneroso (Almeida Filho, 2015), logo, LST e VANTs, por exemplo, podem tornar tal controle mais fácil ao considerar que dão maior detalhe e precisão nas análises, possibilitando reduzir erros e contribuindo com a adoção de medidas mitigadoras mais bem empregadas. Goodwin *et al.* (2016) esperam que o incremento de estimativas das mudanças geomorfológicas e de volume levem a um avanço maior na compreensão da erosão por voçoroca e seus processos, contribuindo com a avaliação do desempenho de medidas de controle e estabilidade da erosão.

### **5.3. DIAGNÓSTICO DA EROSÃO**

Os primeiros resultados componentes do diagnóstico da erosão na bacia hidrográfica do Alto rio Pirai advêm dos mapeamentos processados em ambiente GIS, de acordo com as bases cartográficas do IBGE em escala 1:25.000 do Estado do Rio de Janeiro. Desse modo, as figuras 43, 44 e 45 apresentam, respectivamente, os mapas de hipsometria, declividade (em graus) e forma das encostas.

As voçorocas A e B, destacadas neste estudo, estão localizadas na faixa de hipsometria de 440 a 600 metros de altitude, correspondentes ao tom mais escuro de verde,

que margeia praticamente todo o canal do rio Pirai em seu alto curso e transição para o médio.

Em termos de declividade, as duas áreas estão predominantemente inseridas nos intervalos entre 27° e 34° graus (laranja) e 34° a 43° graus (vermelho), predominando em cada faixa a encosta da Voçoroca B e as encostas da área da Voçoroca A, respectivamente, esta última alcançando, inclusive, o intervalo máximo, acima de 43° de declividade (vinho).

Conforme o mapa de forma das encostas indica, as áreas côncavas são predominantes e, por conseguinte, é o tipo de forma onde as voçorocas A e B se estabeleceram e expandiram, com o passar dos anos. Isto indica forte correlação, nestas áreas, entre a concentração dos fluxos de escoamento superficial e o avanço da erosão.

O Ortofotomosaico do IBGE foi importante desde o início da pesquisa, conjuntamente às imagens do *Google Earth*. Ambos os materiais serviram ao propósito de mapear possíveis áreas com voçorocamento e erosões lineares outras, em etapas pré-campo e na checagem de pontos verificados durante os trabalhos de campo. É fundamental destacar as diferenças, bem como os prós e contras de cada ferramenta.

A figura 46 apresenta um mapeamento comparativo para as áreas de estudo A e B, com suas respectivas voçorocas. O Ortofotomosaico foi trabalhado na escala 1:6.000 (no *software ArcGIS*). Percebe-se, então, que mesmo em escala de detalhe como esta, há a sensação de que o objeto de estudo encontra-se mais afastado do instrumento captador da imagem, do que nas imagens do *Google Earth*. Essa diferença de visada é um reflexo da qualidade das imagens, sendo o primeiro item a chamar a atenção durante a análise. A resolução espacial do Ortofotomosaico é menor que nas imagens de satélite de alta resolução do *Google Earth*.

## MDE da Bacia do Alto Rio Pirai

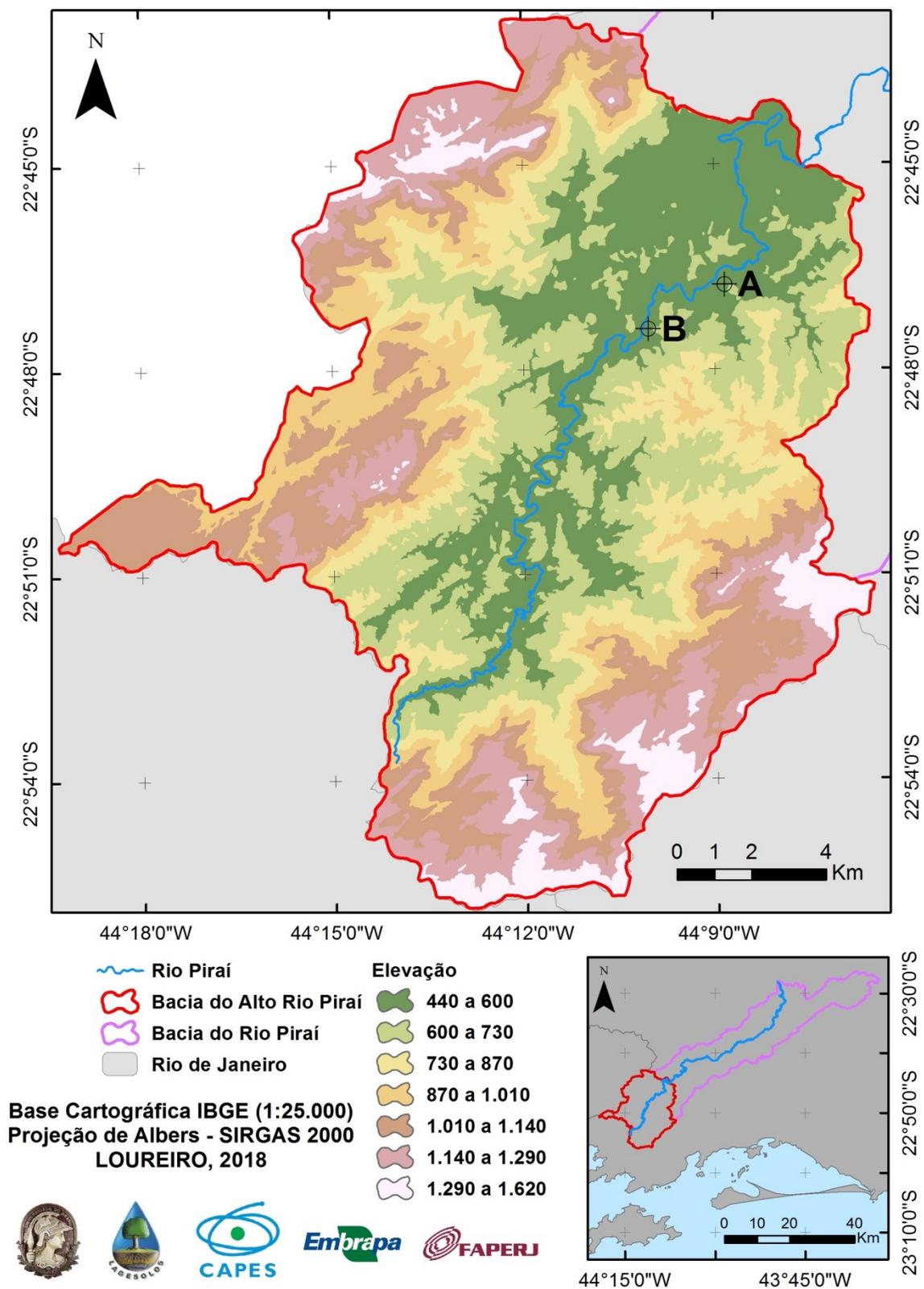


Figura 43 – Mapa com as elevações da bacia hidrográfica do Alto rio Pirai (Município de Rio Claro – RJ), a partir do Modelo Digital de Elevação.

## Declividade na Bacia do Alto Rio Pirai

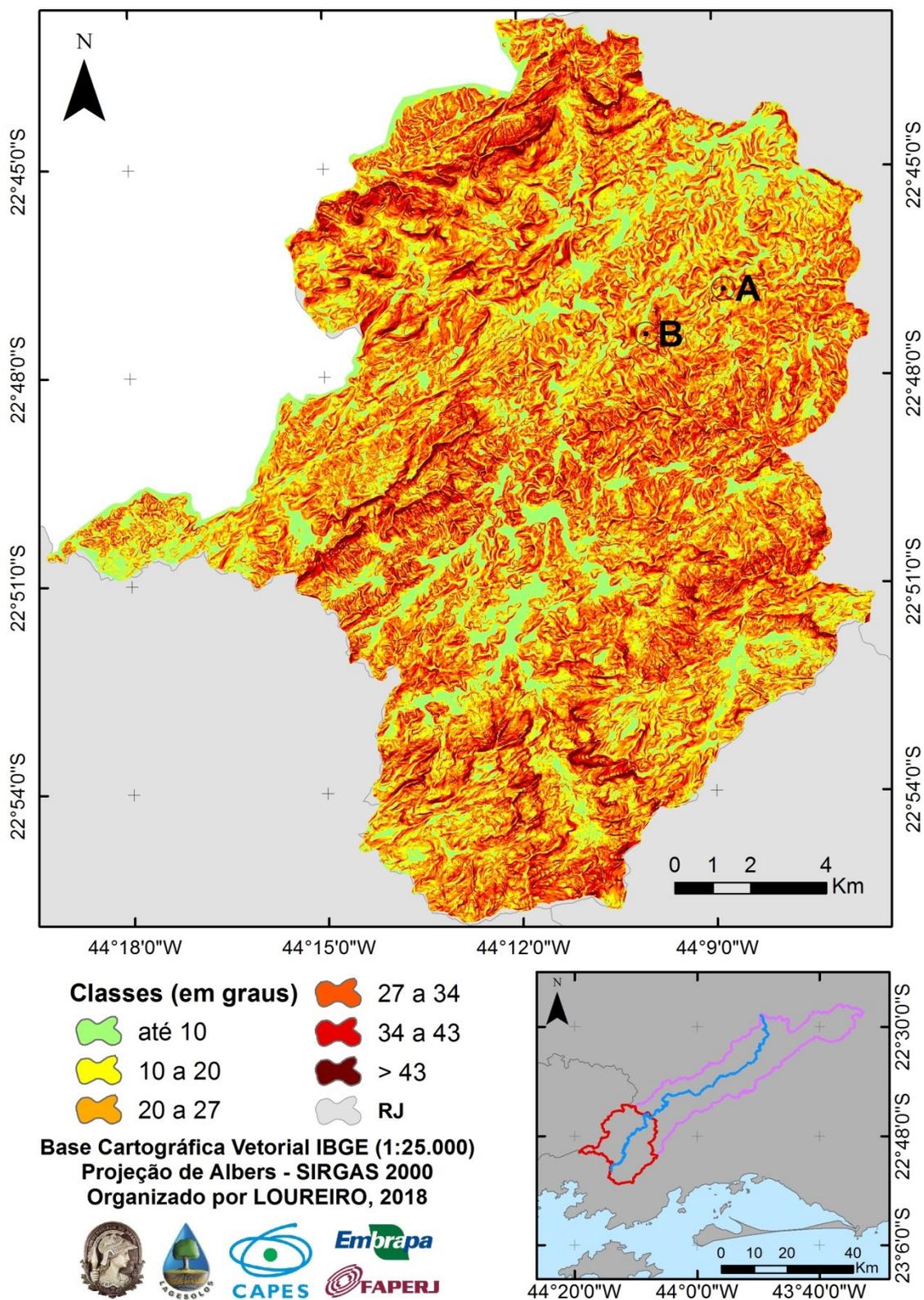


Figura 44 – Mapa de declividade – em graus – da bacia hidrográfica do Alto rio Pirai (Município de Rio Claro – RJ).

## Forma das Encostas na Bacia do Alto Rio Pirai

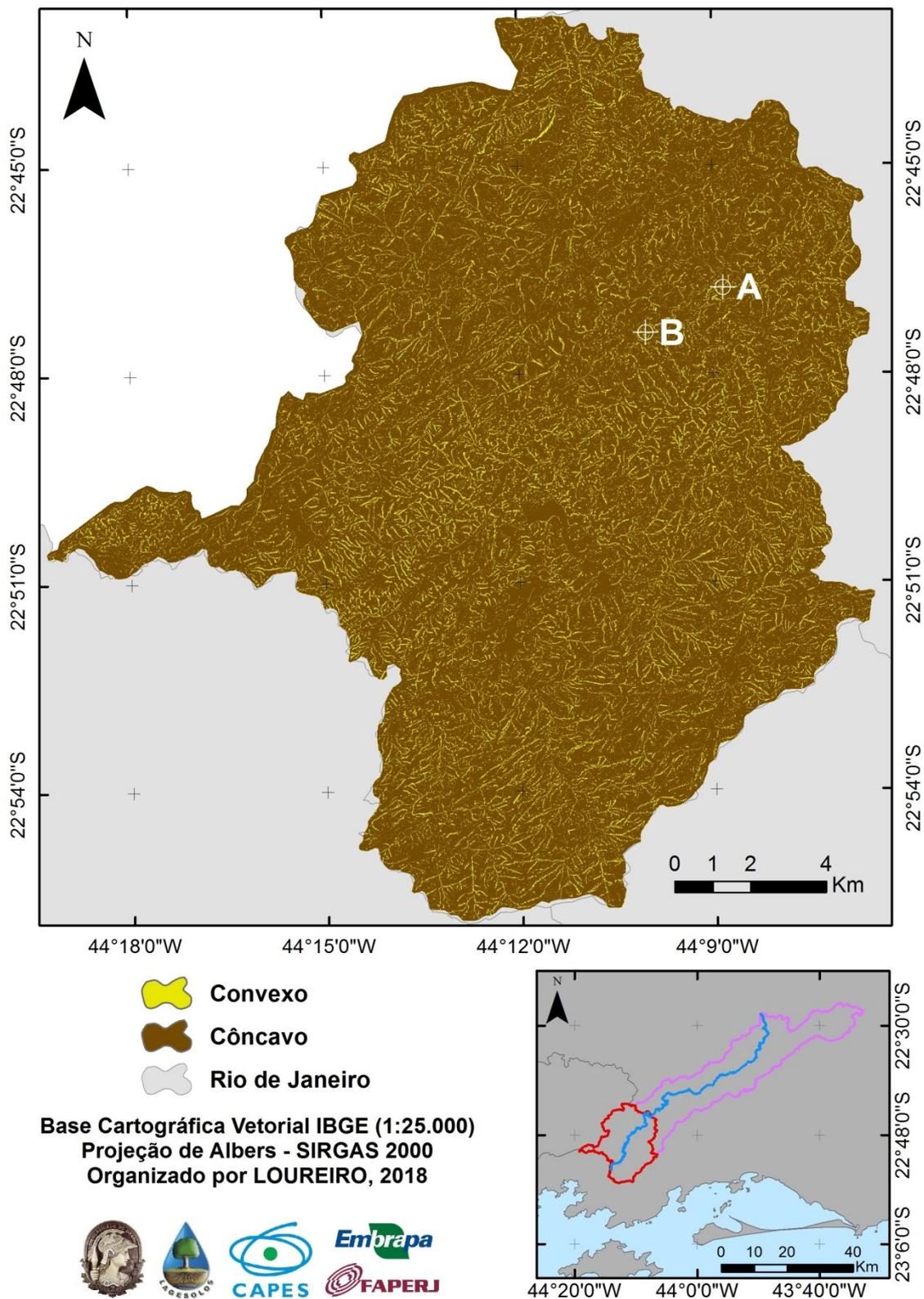


Figura 45 – Mapa de forma das encostas da bacia hidrográfica do Alto rio Pirai (Município de Rio Claro – RJ).

## Áreas A e B com Voçorocas na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Pirai



Figura 46 – Mapa de comparação entre imagens de satélite do *Google Earth*<sup>TM</sup> e trechos correspondentes do Ortofotomosaico do IBGE, para as áreas das voçorocas A e B.

No mapeamento é fácil notar, também, as diferenças na morfologia das duas áreas, em razão do momento de cada imagem. O Ortomosaico registrou suas fotografias aéreas em 2006, enquanto as imagens mais recentes do *Google Earth*, até aqui, são de outubro de 2017, mais de 10 anos à frente. Nesse sentido, há alguns prós e contras. Por um lado, a idade mais avançada das ortofotos do IBGE, que compõem o Ortomosaico, pode ser vista como problema para mapeamentos atualizados, por não condizer com a realidade recente. Por outro, pode ajudar a compor diagnósticos, ou contribuir com análises que envolvam períodos determinados.

Portanto, a utilidade do Ortofotomosaico é percebida, por exemplo, ao verificarmos a morfologia atual da área da voçoroca B, que influencia em dois aspectos: primeiro, devido ao reflorestamento realizado ali (2016 e 2017), um levantamento que considerasse apenas o *Google Earth* poderia ter dificuldade em notar a ocorrência de uma feição erosiva linear nessa encosta, ou mesmo não nota-la; segundo que a imagem atual não possibilita visualizar

quais seriam os formatos da feição erosiva, o que acaba sendo melhor de se ver no Ortofotomosaico.

Partindo-se, então, do levantamento pré-campo de áreas vitimadas pela ocorrência de voçorocas, através do Ortomosaico do IBGE e das imagens do *Google Earth*; passando pela realização dos trabalhos de campo, para checagem do que foi levantado e registro de outras feições observadas apenas em campo; foram mapeadas 25 feições erosivas na bacia do Alto rio Pirai (figura 47). Como áreas de estudo destacam-se as voçorocas A e Q, na mesma área, e a voçoroca B. Entre as demais áreas com voçorocamentos, foram destacadas as voçorocas C e FS, pelo fato de terem tido seus solos amostrados e analisados conjuntamente aos das áreas de estudo A e B.

É possível inferir que exista algum tipo de controle estrutural na ocorrência das voçorocas, visto que elas se localizam, de certa maneira, em encostas com proximidade ao rio Pirai. Isto exige estudos geológicos futuros mais profundos. Mas é fundamental destacar que há, contudo, forte correlação entre algumas voçorocas e a passagem de estradas, sejam elas de ferro, pavimentadas ou não. Isto será discutido mais adiante nesta seção do capítulo, pois representa um dos resultados da pesquisa.

Nascimento *et al.* (2013 in Etchelar, 2017) destacam o recurso “imagens históricas” do *Google Earth*, por oferecer séries temporais de imagens da mesma área. Reforçam que com ele, a depender da quantidade – e qualidade – das imagens, é possível realizar “um diagnóstico regressivo” da erosão, com análises sobre a dinâmica, a velocidade e a tendência de evolução, neste caso, chegando a prognósticos. Loureiro (2013) também utilizou a série temporal de imagens históricas do *software Google Earth* para diagnosticar processos erosivos lineares, afirmando serem muito úteis em trabalhos geográficos, ainda que contenham imprecisões cartográficas. Este aspecto não impede que o valor de suas contribuições venha sendo cada vez mais reconhecido na literatura científica geomorfológica.

## Mapeamento de Feições Erosivas na Bacia do Alto Rio Pirai

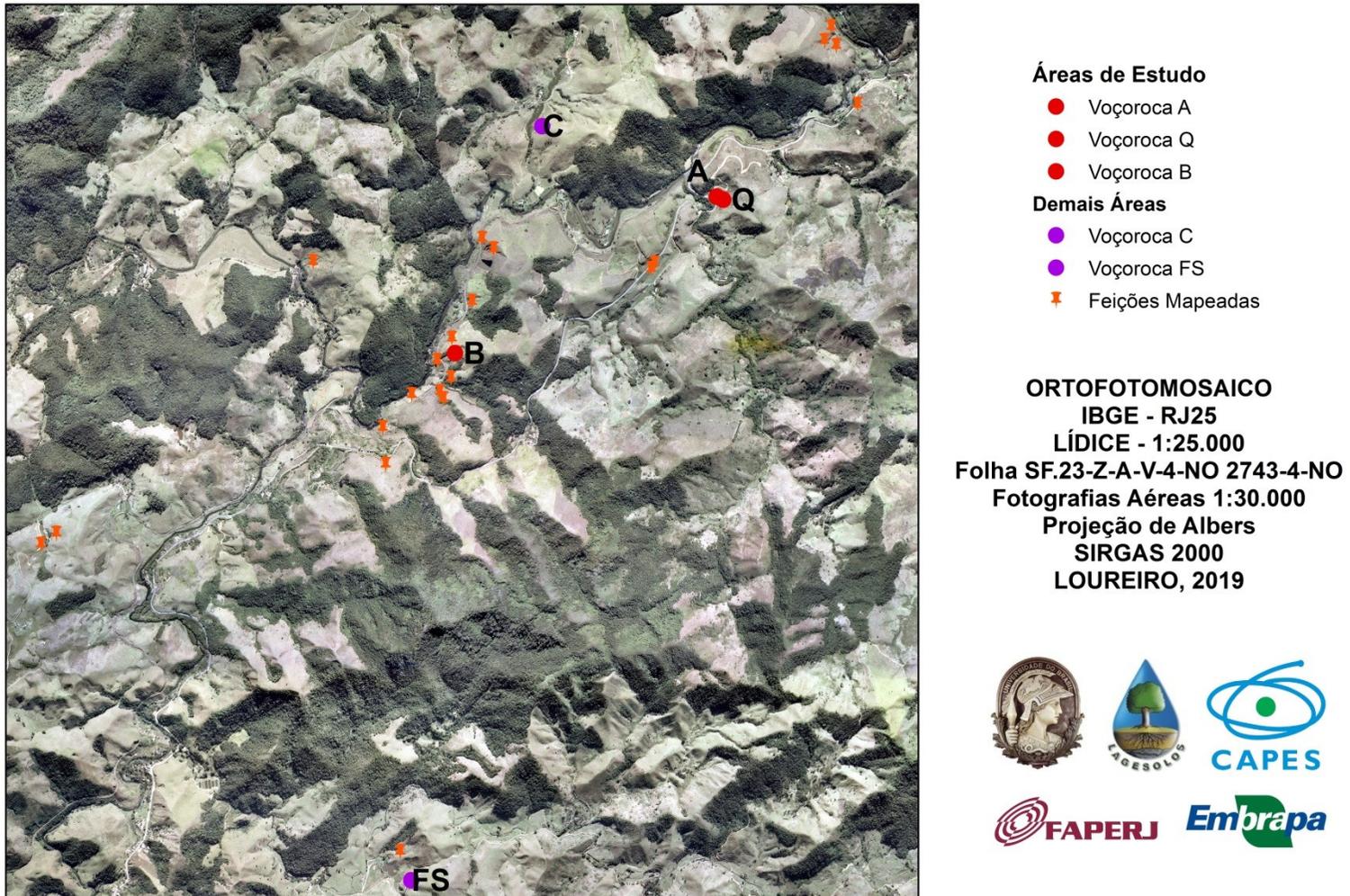


Figura 47 – Mapa de feições erosivas lineares na bacia hidrográfica do Alto rio Pirai.

Assim, Boardman (2016) conclui, de forma categórica, que o *Google Earth* é, enquanto parte integrante de pesquisas de campo, ideal para mapeamentos de reconhecimento e descoberta de áreas não percebidas durante os trabalhos de campo, permitindo que feições erosivas, que perdurem por anos na paisagem, possam ser mapeadas através do uso deste *software*. Este é um tipo de uso que não exige precisão cartográfica, que o *software Google Earth* não possui.

Essas ideias são corroboradas nesta pesquisa, que se utiliza bastante deste recurso para a composição deste diagnóstico. É importante destacar que o diagnóstico se constitui de análises qualitativas (das imagens *Google*; do Ortofotomosaico do IBGE; dos mapas temáticos; das imagens aéreas do VANT; e de fotografias de campo) e quantitativas (análises de solo; mapas temáticos; e produtos do escaneamento a laser terrestre).

A figura 48 é composta por imagens históricas contidas no *Google Earth*, dos anos de 2001 (a mais antiga), 2007, 2011, 2012, 2016 e 2017 (a mais atual), para a área de estudo da voçoroca A. Imagens disponíveis para os anos de 2013 e 2015 apresentam qualidade muito inferior a estas, por isso ficaram de fora da análise.

Através da sequência dessas imagens é possível acompanhar a evolução do tamanho e formato da voçoroca A (VA), destacando-se alguns momentos principais. Para 2001, é possível inferir que VA evoluiu recebendo grande quantidade de fluxos pluviais, vindos do canal de saída de VQ, enquanto caminho preferencial diretamente conectado à borda de VA. As imagens e os trabalhos de campo indicam que VQ não teve mudanças morfológicas significativas, possuindo elevado grau de estabilidade desta feição.

De 2001 para 2007, fica registrado um grande avanço do processo erosivo, que transforma a morfologia de VA, aparentando maiores profundidade e mobilização de material em seu interior. A imagem de 2011 capta o segundo marco de avanço da erosão. Em 2012 não se verifica avanço significativo para a sequência. Já 2016 traz VA com o formato próximo ao que se conhece atualmente, representando um terceiro e último marco de mudança maior da sua morfologia. Para 2017 observa-se a mais notória colonização da cobertura vegetal no interior de VA, com solo menos recoberto nas duas imagens anteriores e completamente exposto nas três primeiras.



Figura 48 – Voçoroca A em sequência de imagens histórias do Google Earth™.

O uso da ferramenta *Street View* (do *Google Maps*) é mais restrito, pois não há disponibilidade para a totalidade de estradas rurais e a série temporal de imagens é menor que no *Google Earth*. Normalmente, há de dois a quatro períodos de imagens, dependendo da posição da câmera. Foram utilizadas fotografias dos anos de 2012, 2015 e 2017 para as voçorocas A e B (VB), julgando-se desnecessário o uso de imagens de 2011, de menor qualidade. A figura 49 traz um ângulo de VA que mostra a totalidade de sua extensão.

As imagens do *Street View* do *Google Maps* podem servir, então, como fotografias de campo pretéritas. No caso da VA chama atenção na sequência a colonização da vegetação no seu interior, em primeiro lugar. Na comparação com as imagens históricas do *Google Earth*, esta situação corresponde às imagens de 2016 e 2017, conforme analisado anteriormente. Pode-se destacar, em segundo lugar, a posição da cabeceira na encosta, principalmente ao se observar a imagem de 2017, comparada à de 2012, mostrando claramente que houve avanço da erosão à montante da encosta.

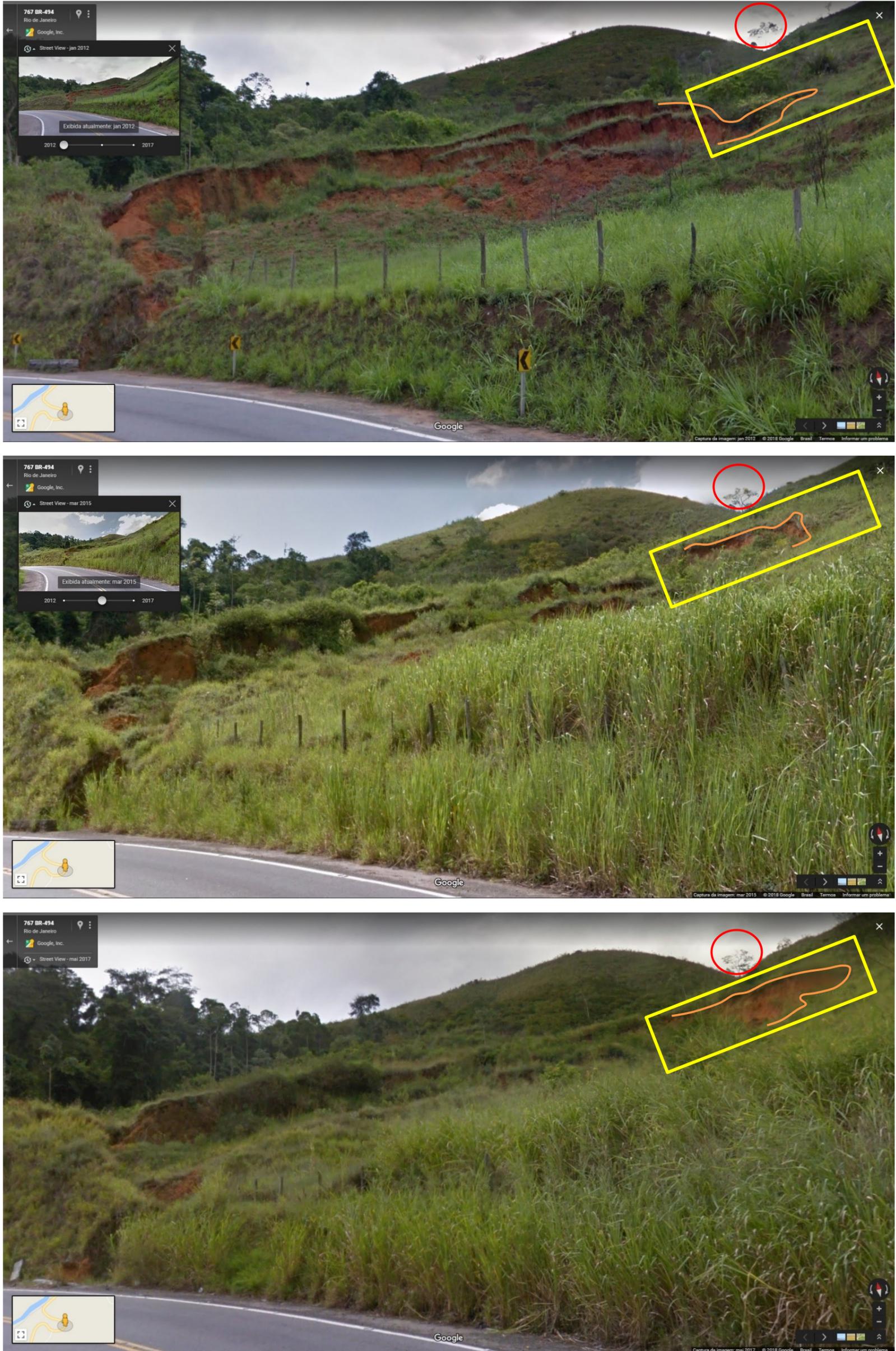


Figura 49 – Três momentos da voçoroca A registrados no recurso *Street View* do *Google Maps*. De cima para baixo: janeiro de 2012, março de 2015 e maio de 2017. A sequência das imagens mostra a colonização natural da vegetação no interior da voçoroca. Esta permanece ativa, com crescimento em menor velocidade, concentrado na cabeceira, principalmente pelo lado direito (destacado em amarelo, com borda traçada em laranja e destaque em vermelho para servir de referência entre as três imagens).

Seguindo no diagnóstico a partir dos produtos disponibilizados pela *Google*, VB apresenta outras respostas (figura 50). Com imagens do *Google Earth* também dos anos de 2001, 2007, 2012, 2016 e 2017, excluindo da série histórica a referente ao ano de 2011 por opção didática, percebe-se que a morfologia da encosta sofreu alterações significativas a partir de 2016 em função do reflorestamento feito pelo ITPA, mas que as feições erosivas presentes não demonstraram evoluções significativas. Não significa que a erosão tenha cessado. Apenas que a evolução não é perceptível visualmente como o é para VA. A última imagem da mesma figura 50 (f) é uma fotografia aérea produzida pelo VANT utilizado, destacando-se pela elevada qualidade de resolução, comparada às imagens *Google*, além de apresentar ângulo de visada melhor.

As imagens posteriores, ambas do *Google Earth* (figura 51), são utilizadas para algumas considerações importantes. VB é uma feição disforme, sua delimitação é bastante dificultada, devido sua posição em face acidentada da encosta, com reentrâncias, algumas recobertas por vegetação, principalmente após o desenvolvimento do reflorestamento. Portanto, a imagem de 2011 (à esquerda) facilita a visualização das bordas. Além disso, deixa clara e destacada a ocorrência de uma voçoroca abaixo da Linha Férrea, na continuação da encosta à jusante. Já a imagem de 2017 (à direita) é utilizada por ser a mais recente, sendo marcada nela dois transectos (latitudinal ou horizontal e longitudinal) realizados em campo, como tentativa de medição de feição, o que se mostrou impossível, por causa de sua dimensão e forma irregular. A ponta direita do transecto horizontal representa o ponto de coleta BPD, ou seja, considerado em campo como sendo a parede direita da VB.

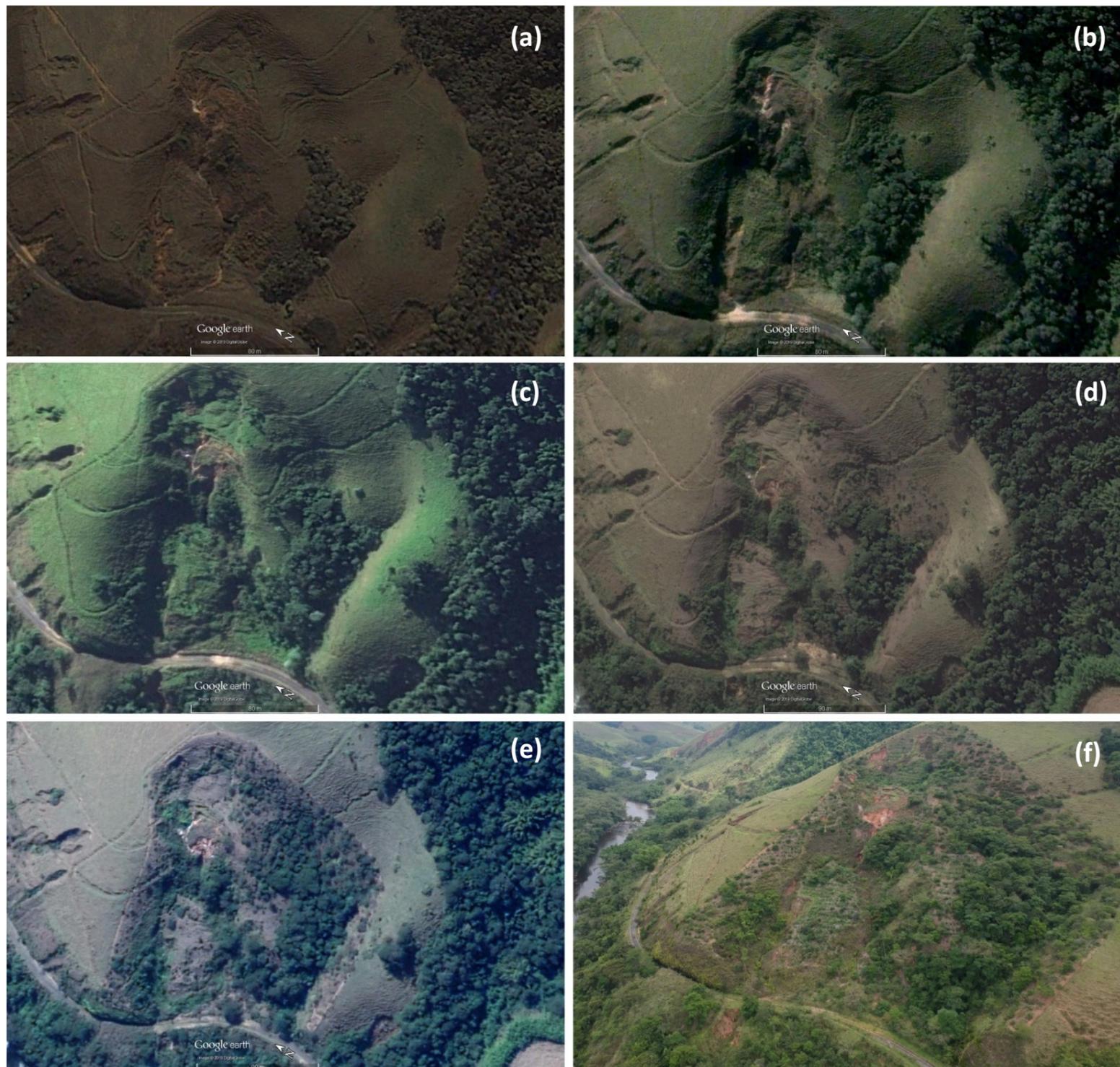


Figura 50 – Sequência de imagens históricas do *Google Earth*, dos anos de (a) 2001, (b) 2007, (c) 2012, (d) 2016 e (e) 2017, indicam feições estabelecidas desde 2001, com evolução reduzida ou pontual. Imagem do VANT (f), de dezembro de 2017, mostra qualidade bastante superior.



Figura 51 – A imagem de 2011 (à esquerda) define um pouco melhor os formatos da voçoroca B e realça, no limite inferior da imagem, o surgimento de voçoroca à jusante da Linha Férrea. Na imagem de 2017 (à direita), a posição do transecto horizontal (em vermelho) mostra que a definição da parede direita era clara no campo, local onde foi coletada a amostra BPD.

Na figura 52, a imagem do VANT, na parte inferior, somada às fotos de campo, facilita a compreensão da disposição de formas e feições na encosta. A foto à esquerda destaca um ponto de referência comum com a imagem do VANT, mostrando parte da medição do transecto horizontal. A foto à direita mostra a parede direita, com coleta no ponto BPD.

As imagens Street View de 2012, 2015 e 2017 (figura 53) possuem ótima qualidade e tiveram utilidade maior que em VA, pois serviram para corroborar com as figuras 50 e 51 em relação à delimitação da feição e destacam melhor que qualquer imagem a diferença de cobertura vegetal proporcionada pelo reflorestamento do entorno de VB.

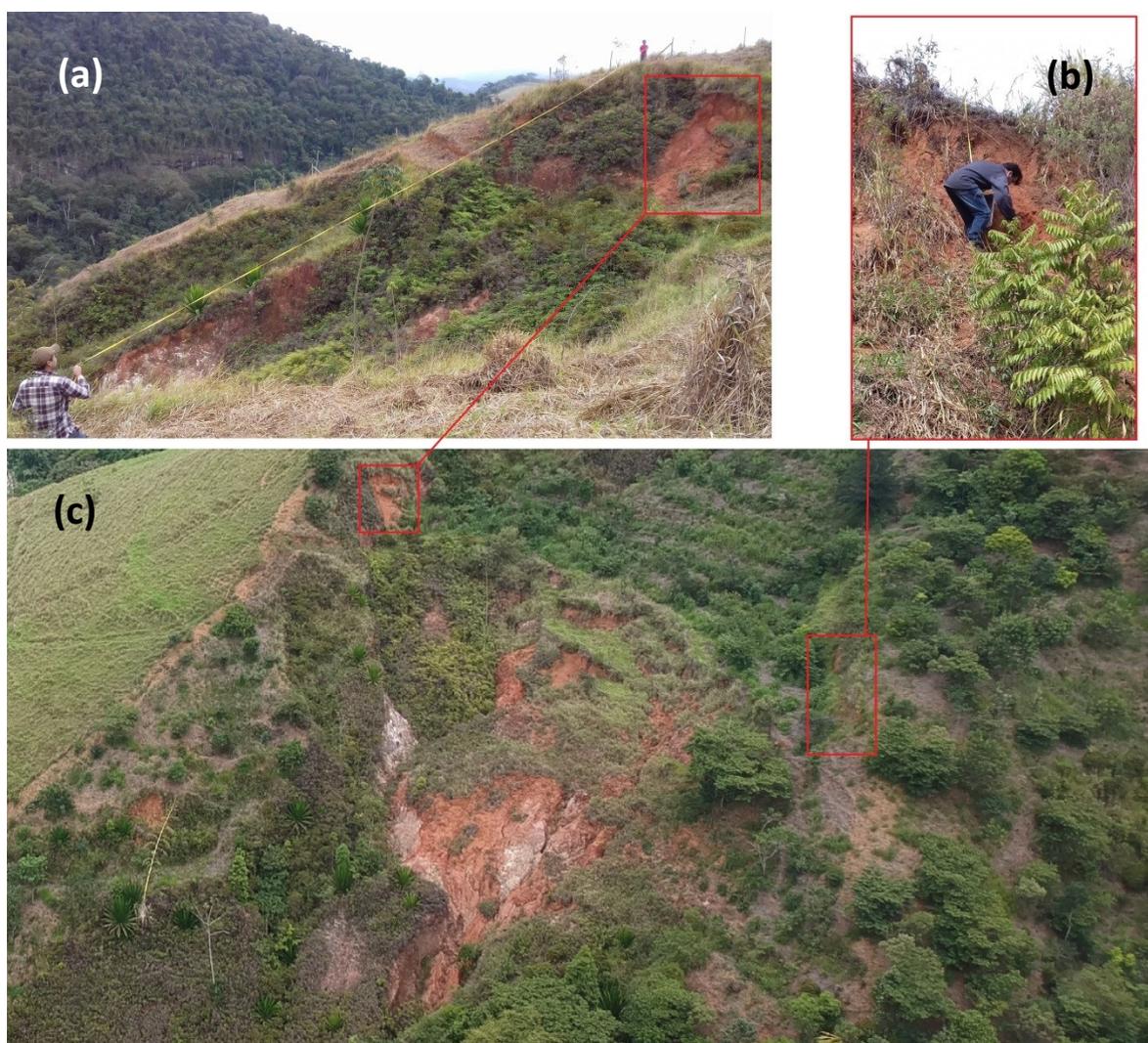


Figura 52 – Imagem de VANT (c) ajuda a destacar a localização de dois pontos na voçoroca B: local de onde partiu o transecto horizontal (a) e local de coleta na parede direita (b). Fotos: (a) e (b) Gabriel Nunes (2016). Foto aérea: Fabrizio Garritano (2017).

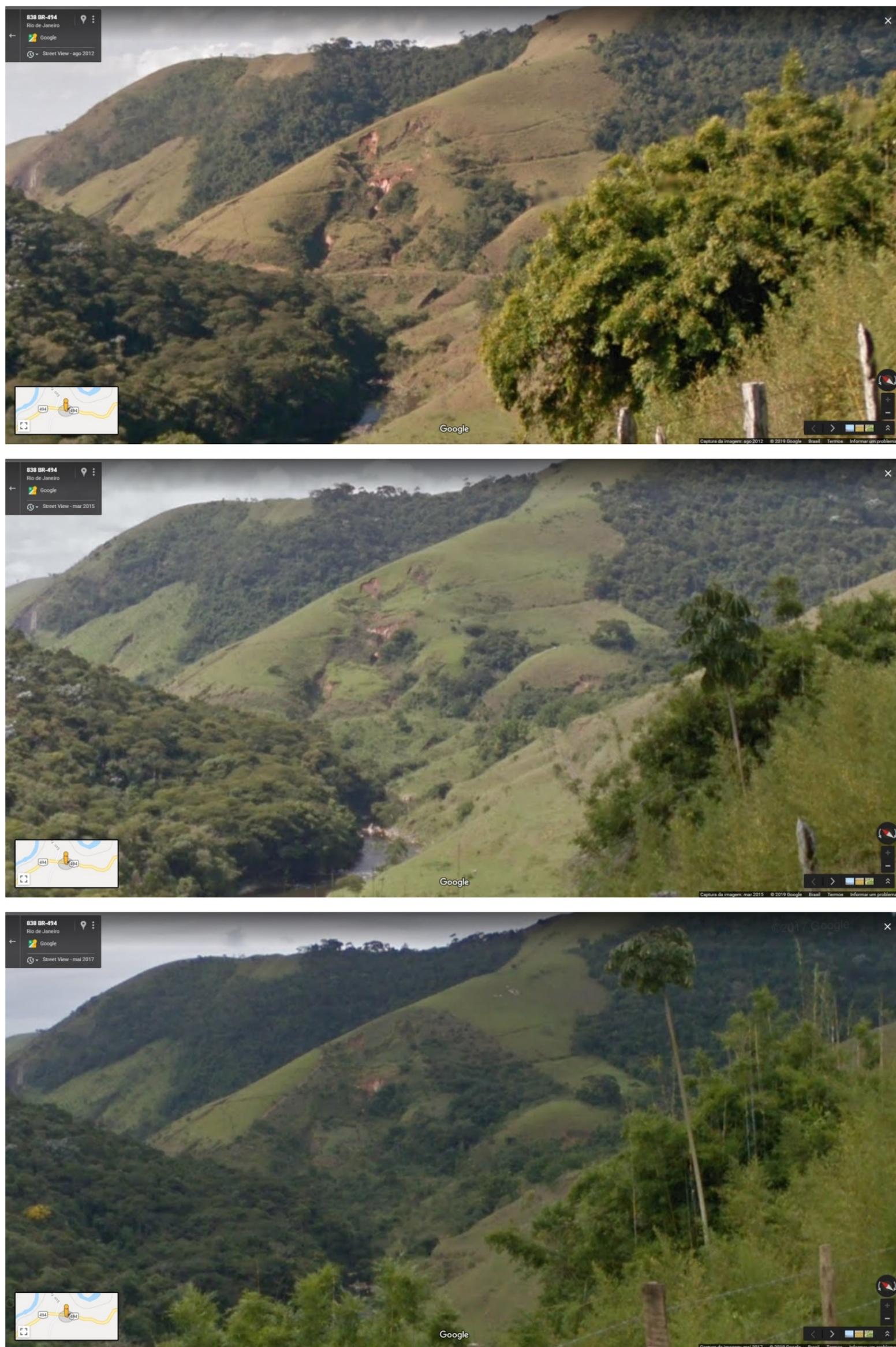


Figura 53 – Três momentos da voçoroca B capturados desde a RJ-155/BR-494 pelo recurso *Street View* do *Google*. De cima para baixo: agosto de 2012, março de 2015 e maio de 2017. A grande mudança não se dá no tamanho da voçoroca, mas no recobrimento de sua encosta em função de reflorestamento realizado pelo ITPA nos anos de 2016 e 2017, que não realizou quaisquer intervenções contra o processo erosivo.

Como mencionado anteriormente, apesar da pouca evolução na morfologia de VB, foi comprovado durante trabalhos de campo a manutenção de sua atividade, ao ser verificado o soterramento de parte da Linha Férrea, no trecho imediatamente em frente ao leque ou delta de sedimentos que saem da voçoroca em eventos de chuva (figura 54).



Figura 54 – Linha Férrea desaparece, coberta por sedimentos oriundos da voçoroca B, confirmando que há atividade nesta feição. Fotos: Hugo Alves S. Loureiro (2016).

O diagnóstico para a área de estudo B, que não contou com varredura do LST, se encerra trazendo um tipo de resultado instigante (para futuros trabalhos) e verificado de forma recorrente em outras voçorocas, tanto da bacia do Alto rio Piraí, tratadas no presente estudo, como na Serra Macaense (LOUREIRO, 2013), que tenham relação com estradas, independente se férreas ou rodoviárias e do tipo de pavimento.

Constatou-se ao longo da pesquisa, durante os trabalhos de campo, um problema grave referente aos sistemas de drenagem das diferentes estradas. Obras de engenharia que pecaram na questão do montante, da distribuição e do direcionamento dos fluxos de águas

pluviais e acabam representando gatilhos que deflagram processos erosivos severos, como as voçorocas.

A figura 55 esquematiza, didaticamente, a situação verificada ao acaso, durante momento de reconhecimento do sopé da área de estudo B, em trabalho de campo em novembro de 2016. A imagem do VANT (de dezembro de 2017), com sua excelente qualidade, mais uma vez orienta espacialmente a análise. Na saída da voçoroca B, onde a Linha Férrea passa, segue-se o caminho que sedimentos e água das chuvas percorrem, chegando à calha de drenagem pluvial. O despejo dos fluxos pluviais é realizado encosta abaixo, levando a processos erosivos que resultaram na voçoroca à jusante, visualizada na imagem direcionada pela seta preta, após a calha.

Para VB a situação relaciona-se com o corte e passagem da estrada de ferro, mas foram observadas outras ocorrências ao longo da bacia do Alto rio Pirai, em condição de estrada pavimentada: na área de estudo A, relacionada com VA (figura 56); e próximo a ela, em trecho de reta da estrada RJ-155/BR-494, que se convencionou chamar voçoroca E (VE) (figura 57), que tem tido estudo voltado especificamente a ela (SUAREZ *et al.*, 2018).

No mapa comparativo são apresentadas brevemente duas áreas com voçorocamentos de destaque na bacia do Alto rio Pirai (figura 58). Primeiro, um conjunto de voçorocas próximo ao posto de combustíveis do bairro Cascata, acessíveis a pé atravessando-se uma velha Ponte de Ferro da linha férrea. A principal delas foi trabalhada por Garritano *et al.* (2018b). Sua origem parece diretamente relacionada com o corte da encosta para a passagem da ferrovia que fazia ligação entre Angra dos Reis e Barra Mansa. No referido trabalho, os autores utilizaram imagens de VANT e o recurso de imagens históricas do *Google Earth* (2001, 2007, 2011 e 2017) correspondendo a um padrão possível. Novamente, a evolução no tamanho e formato da voçoroca PC1 se destaca pela imagem de 2017 do *Google Earth*, comparada ao Ortomosaico de 2006.

O mesmo ocorre com a segunda dupla de imagens, correspondente a uma ótima área para estudo da erosão, exceto pela inacessibilidade com veículos comuns. Na imagem de alta resolução se destacam a voçoroca D (à direita) e a percepção de intensa degradação na encosta junto à estrada rural. Somente no campo se pode verificar (e espantar) com o voçorocamento que, quase literalmente, engole a estrada de terra (figura 59).



Figura 55 – Água e sedimentos saem da voçoroca B em direção à calha de águas pluviais. Esta drena para a parte inferior da encosta, abaixo dos trilhos, onde uma voçoroca se formou por esta falha do sistema de drenagem pluvial. No detalhe, em vermelho, mochila preta auxilia na orientação das imagens e em amarelo destaca-se um ponto de referência no interior da calha. Fotos: Hugo Alves S. Loureiro (2016).



Figura 56 – Imagens (a) e (b) com calha desobstruída. Estrutura rígida em (a) destruída por acidente de trânsito em (b) e recuperada com sacos em (d). Fotos (c) e (e) registram calha soterrada de material de VA, após chuvas volumosas em fevereiro de 2018. Na foto (f) a saída da calha, no outro lado da via, em outra voçoroca. Fotos: Hugo Alve S. Loureiro (a – 2016; d – 2017; c, f – 2018); Diego Janoti Suarez (e – 2018); Google Street View™ (b – 2017).



Figura 57 – Voçoroca E prejudicando a estrada e gerando risco à segurança. Problema grave do sistema de drenagem da estrada em talude de aterro. À esquerda, na parte inferior da foto, a entrada da calha de um lado da estrada leva ao outro lado, com saída na voçoroca. Fotos: Hugo Alves S. Loureiro (2016 e 2017).

## Voçorocas na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Pirai

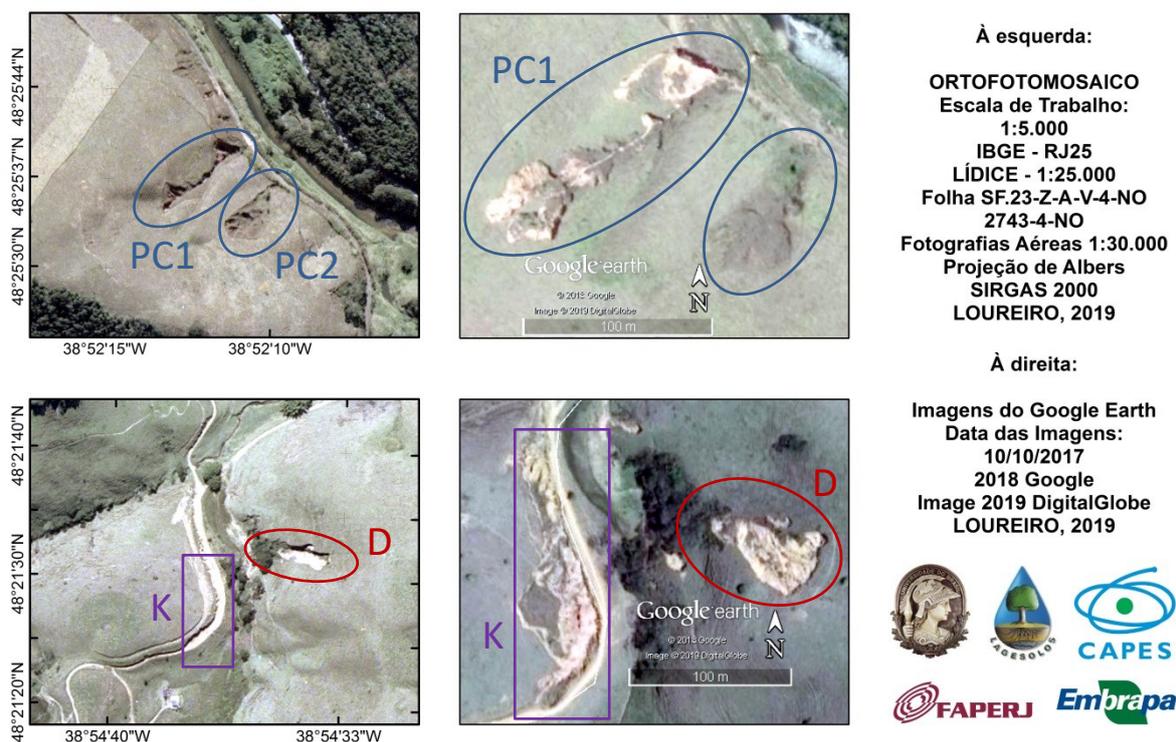


Figura 58 – Mapa de comparação entre imagens de satélite do *Google Earth*<sup>TM</sup> e trechos correspondentes do Ortofotomosaico do IBGE, para as áreas das voçorocas do Posto Cascata (PC1 e PC2), acima, e das voçorocas D e K, esta em estrada rural, abaixo.

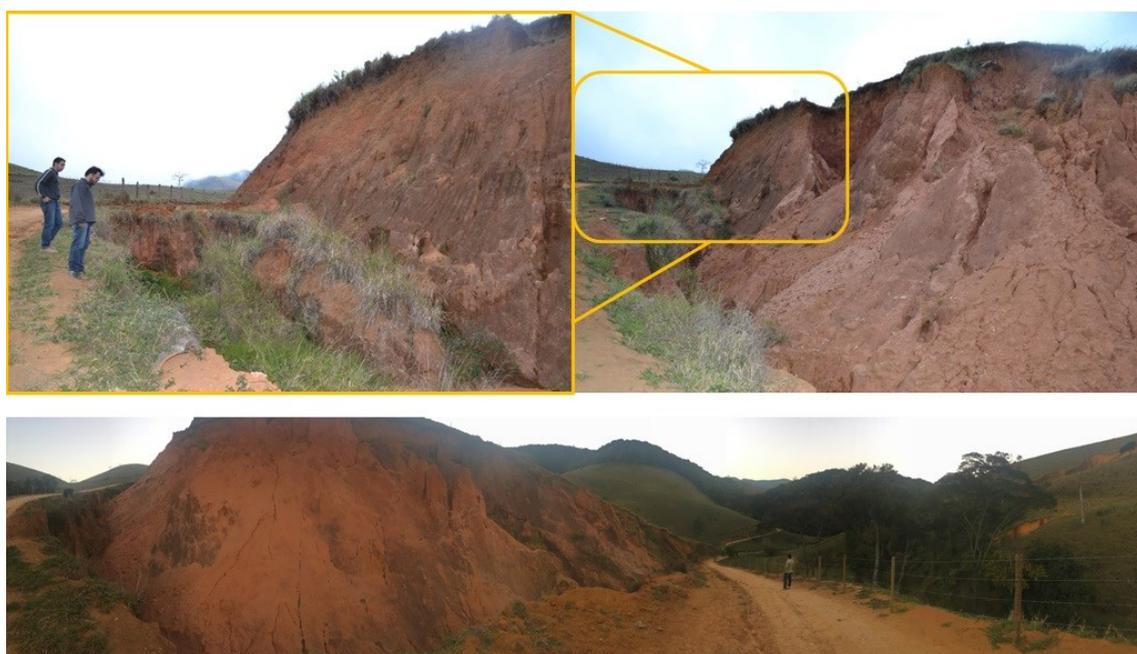


Figura 59 – Voçoroca K em três ângulos: panorâmico, abaixo (Fabrizio Garritano, 2018); e acima, desde o meio até o topo da estrada e o topo no detalhe (Rafael C. dos Santos, 2016).

Ainda que possua inúmeras vantagens, tratadas anteriormente, o *Google Earth* apresenta empecilhos. A arbitrariedade nos tempos de tomada ou disponibilização das imagens impossibilita pesquisas que demandem regularidade temporal, pode levar à perda de importantes momentos dos processos geomorfológicos, e mensurações carecem de precisão, embora algumas sejam possíveis (BOARDMAN, 2016).

Por isso, a partir deste ponto, uso de geotecnologias mais sofisticadas (figura 60), como LST e VANTs profissionais específicos, ganha relevância pronunciada. Estes podem ser capazes de se adequar à periodicidade desejada das pesquisas e gerar medidas tanto de área e extensão, quanto de volume.



Figura 60 – Nuvem de pontos (à esquerda) e imagem aérea do VANT DJI Spark (à direita). Dos dados obtidos pelo LST foram derivados diversos produtos analíticos, quantitativos e qualitativos. Da imagem digital em alta resolução foram possíveis apenas análises qualitativas. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018). Foto: Fabrizio Garritano (2018).

Por estes termos quantitativos, sobressaiu nesta pesquisa o LST, devido a três produtos em especial: modelo tridimensional, que gerou cálculos de área para VA e VQ e de volume para VA; geração de curvas de nível para VA, levando ao mapa de hipsometria; e medidas de comprimento e extensão de seções de VA e VQ.

Etchelar (2017) concluiu que o LST demonstrou seu potencial, devido à precisão e rápida coleta dos dados em campo. A autora verificou que, em um período de 12 anos numa

APA no Rio Grande do Sul, a área de uma voçoroca aumentou 9.188,08 m<sup>2</sup>, ou seja, uma taxa de 765,67 m<sup>2</sup> por ano.

Após diversas etapas de processamento da nuvem de pontos, no *software Leica Cyclone*, o produto reproduzido na figura 61 apresentou os resultados dos cálculos de área e volume, em procedimentos que envolveram a geração de grades de coordenadas, modelagem 3D e geração de malhas de pontos. Tais resultados são expostos no próprio modelo como ficam armazenados em tabela específica do programa.

Portanto, após alguns testes que foram tornando os produtos mais refinados – lembrando a necessidade de “descobrir” o funcionamento do *software* – chegou-se aos seguintes valores (com aproximação) da erosão na VA: **2.240,34 m<sup>2</sup>** de área, considerando a superfície medida através do contorno da voçoroca; e **8.748,00 m<sup>3</sup>** de volume de solo retirado da encosta. No modelo os valores são expostos sem aproximações, com muitos decimais.

O valor volumétrico considera a diferença entre uma superfície hipotética gerada pela modelagem matemática, derivada da nuvem de pontos (que supõe o que seria a superfície da encosta antes de iniciada a erosão linear) e a superfície escaneada, com suas reentrâncias, profundidades e o material solapado e armazenado no interior da feição. Ou seja, contabiliza uma medida volumétrica do espaço vazio entre uma superfície e outra, logo, o quanto de fato saiu de solo de dentro da voçoroca.

Como critério para análise comparativa, faz-se necessário transformar algumas unidades de medida e extrapolar valores para 1 hectare (ha), dando maior padrão aos resultados, conforme realizado por Loureiro (2013). Assim, a medida de área de VA em hectares equivale a **0,22 ha**. O volume de VA equivale a **8.748.000.000,00 cm<sup>3</sup>**. Foi feita a transformação para esta unidade de medida a fim de utilizar a fórmula  $D = \frac{m}{V}$ , onde: **D** é a densidade do solo em **g/cm<sup>3</sup>**, **m** é a massa do solo em **g** e **V** é o volume do solo em **cm<sup>3</sup>**. Há dados de densidade do solo (**DS**) e do volume de solo erodido, restando saber a massa de solo erodida. Deve-se, então, utilizar a fórmula dessa forma: **m = D · V** (LOUREIRO, 2013).

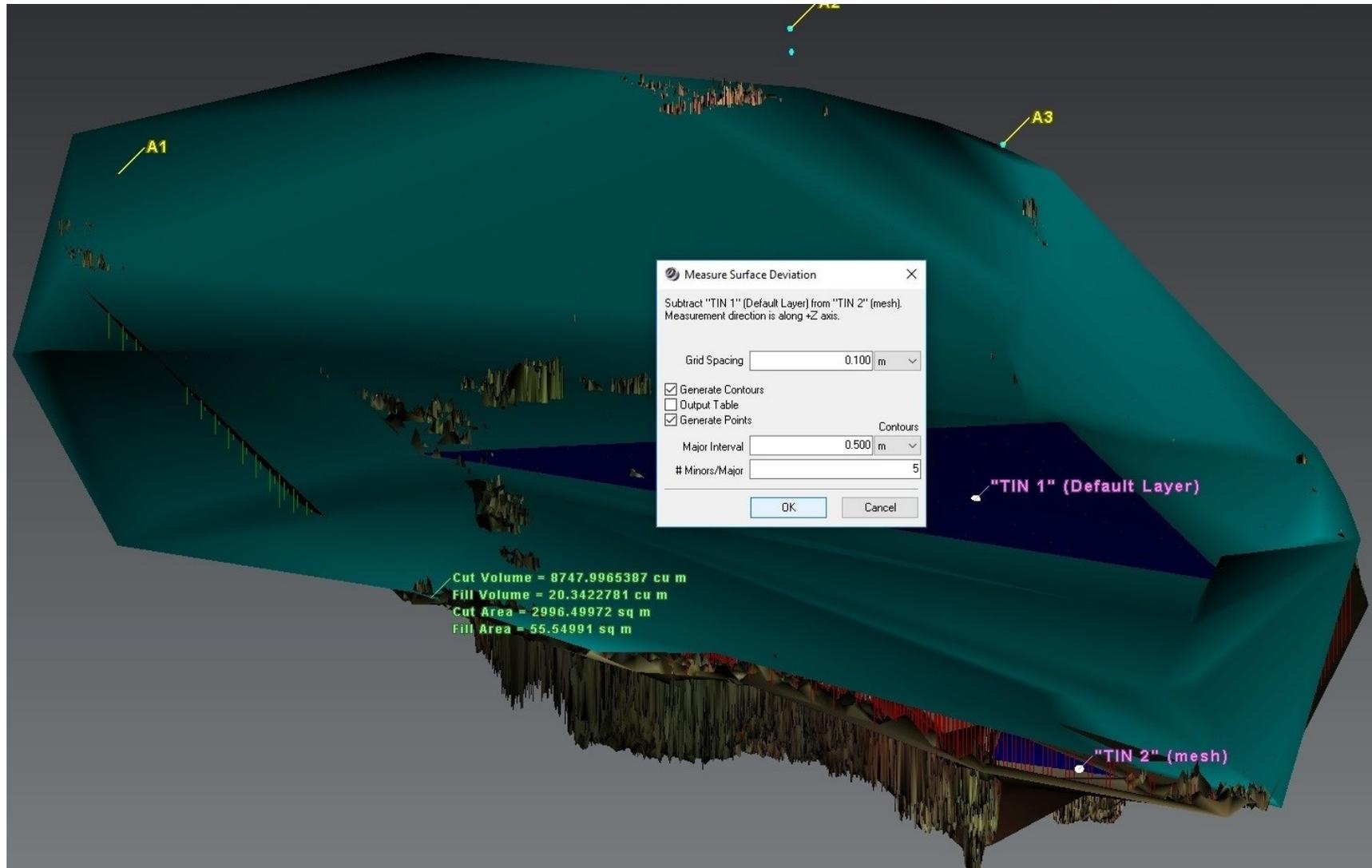


Figura 61 – Reprodução do modelo resultante dos processamentos para cálculo de área ( $m^2$ ) e volume ( $m^3$ ) da voçoroca A. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Realizada a média de todos os resultados de DS (das amostras AP e AS), a densidade ( $D$ ) da voçoroca A foi estabelecida em **1,59g/cm<sup>3</sup>**. Portanto, com o volume em cm<sup>3</sup> e a densidade em cm<sup>3</sup>, ao aplicar a fórmula  $m = D \cdot V$ , a massa total de solo erodido pela voçoroca A foi de **13.909.320.000,00 g**, correspondente em toneladas a **13.909,32 (t)**. Isto em referência aos 0,22 ha de VA, por todo seu período de atividade, maior que 17 anos, ao considerar que a varredura data de 2018 e a imagem mais antiga, com a voçoroca já iniciada, data de 2001. Extrapolando esses valores, a proporção da erosão seria de **63.224,18 t·ha<sup>-1</sup>**. Esta taxa, considerando os 17 anos possíveis de verificação do processo erosivo em VA, significaria uma perda de solo de aproximadamente **3.719,07 t·ha<sup>-1</sup>·ano**.

Como produtos quantitativos o LST ainda trouxe a hipsometria de VA (figuras 62 e 63) e a metragem de seções de VA e VQ (figuras 64 e 65), conforme julgue o usuário do *software*. Embora essencialmente quantitativos, não são desprovidos de características qualitativas, dada à precisão dos dados, também se apresentam como recursos imagéticos. As cores quentes (amarelo a tons de vermelho) indicam áreas mais profundas, em torno de 5 metros abaixo da superfície da encosta, e as cores frias, áreas mais rasas, com maior colonização vegetal, desde a superfície até 4 metros abaixo. As áreas profundas, com cores amarela, laranja, vermelha e vermelha escura, correspondem aos caminhos preferenciais dos fluxos de água e sedimentos e, conseqüentemente, são as zonas mais ativas da voçoroca A.

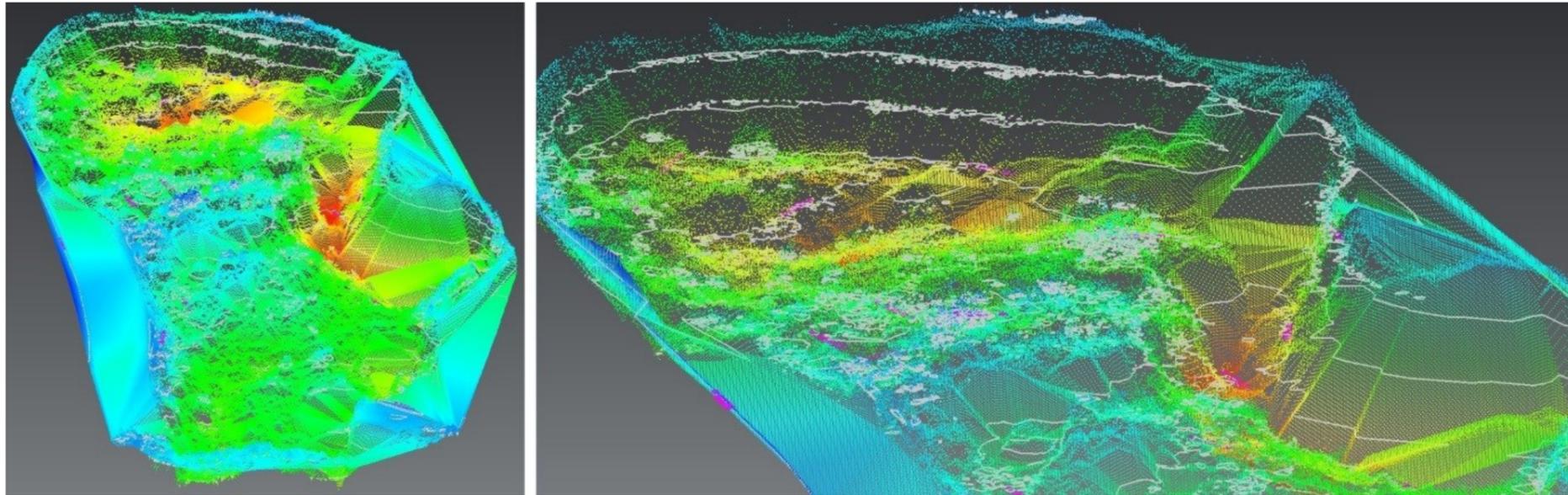


Figura 62 – Reprodução do modelo tridimensional de hipsometria, derivado da geração de curvas de nível (linhas brancas) a partir da nuvem de pontos do LST. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

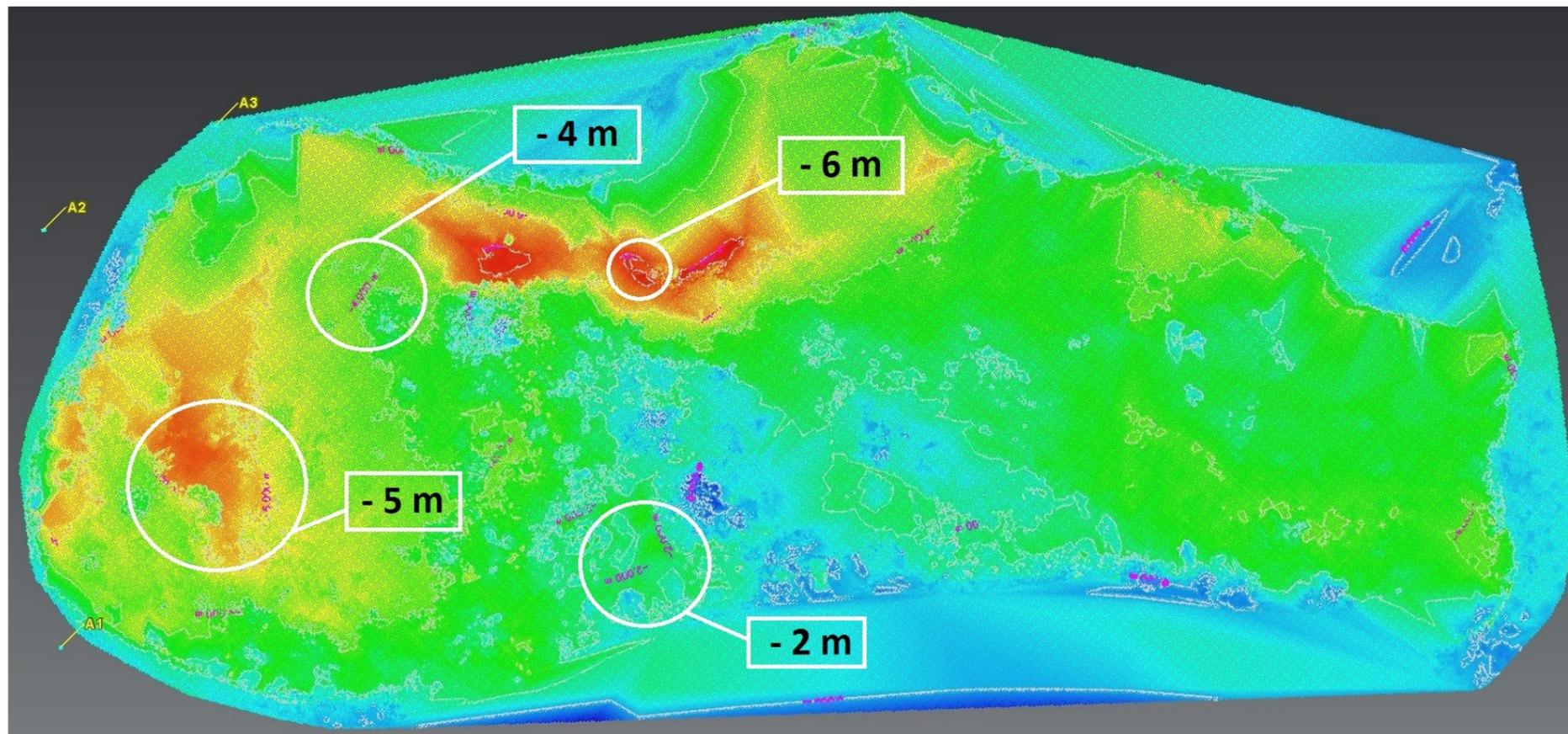


Figura 63 – Reprodução do modelo tridimensional de hipsometria, com destaque para os principais pontos cotados das curvas de nível (linhas finas brancas limitando a mudança entre as cores). Nota-se que as curvas de nível apresentam valores negativos, indicando que se referem a um terreno abaixo da superfície original da encosta. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

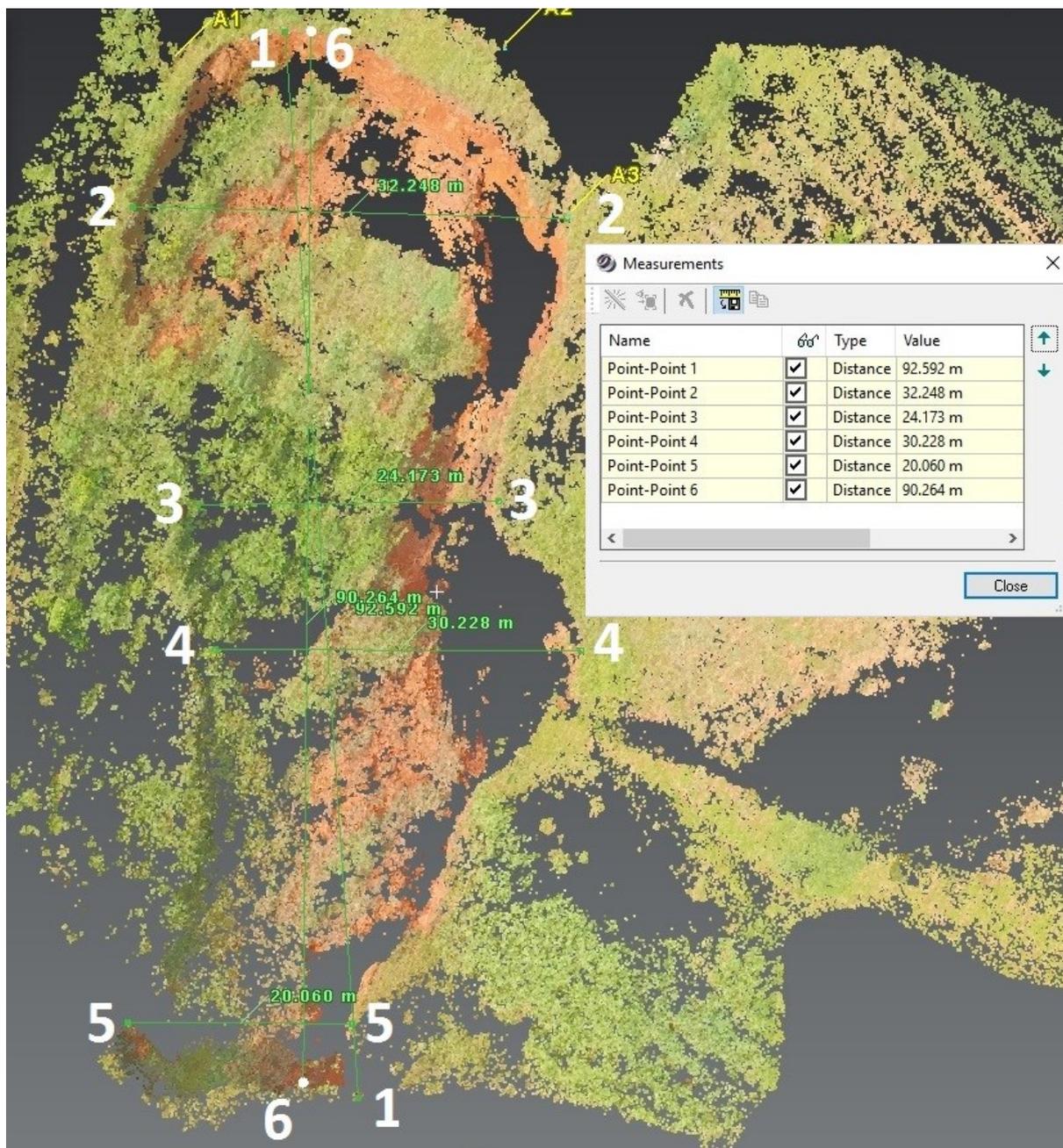


Figura 64 – Medição de seções da voçoroca A. Números brancos foram editados para destacar ponto a ponto os transectos virtuais do *software Leica Cyclone*. Números em verde correspondem aos respectivos *point-point* de acordo com a tabela de mensurações. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Nesta figura 64, a seção 1 corresponde à medida entre os pontos mais distantes da cabeceira e da saída da voçoroca. Já a seção 6 é a medida da feição em linha reta considerando o seu eixo principal. Portanto, a primeira possui 92,59 m e a última 90,26 m.

As demais seções foram selecionadas considerando-se as diferentes larguras existentes entre as bordas esquerda e direita, devido ao seu formato irregular. A menor largura da voçoroca A possui 20,06 m, em seção próxima da saída da feição (5). A maior largura verificada possui 32,25 m, medindo a cabeceira da feição (2).

As medidas da voçoroca Q seguiram os mesmos parâmetros (figura 65). Do ponto mais alto e distante da cabeceira até a saída conectada à VA, mede 57,55 m. Em linha reta, pelo eixo da voçoroca, registram-se 47,32 m. As menores larguras correspondem ao fino canal que conecta VQ e VA, medindo 2,10 m e 3,61 m. A maior largura apresenta 23,25 m, entre a metade e a parte inferior de VQ.

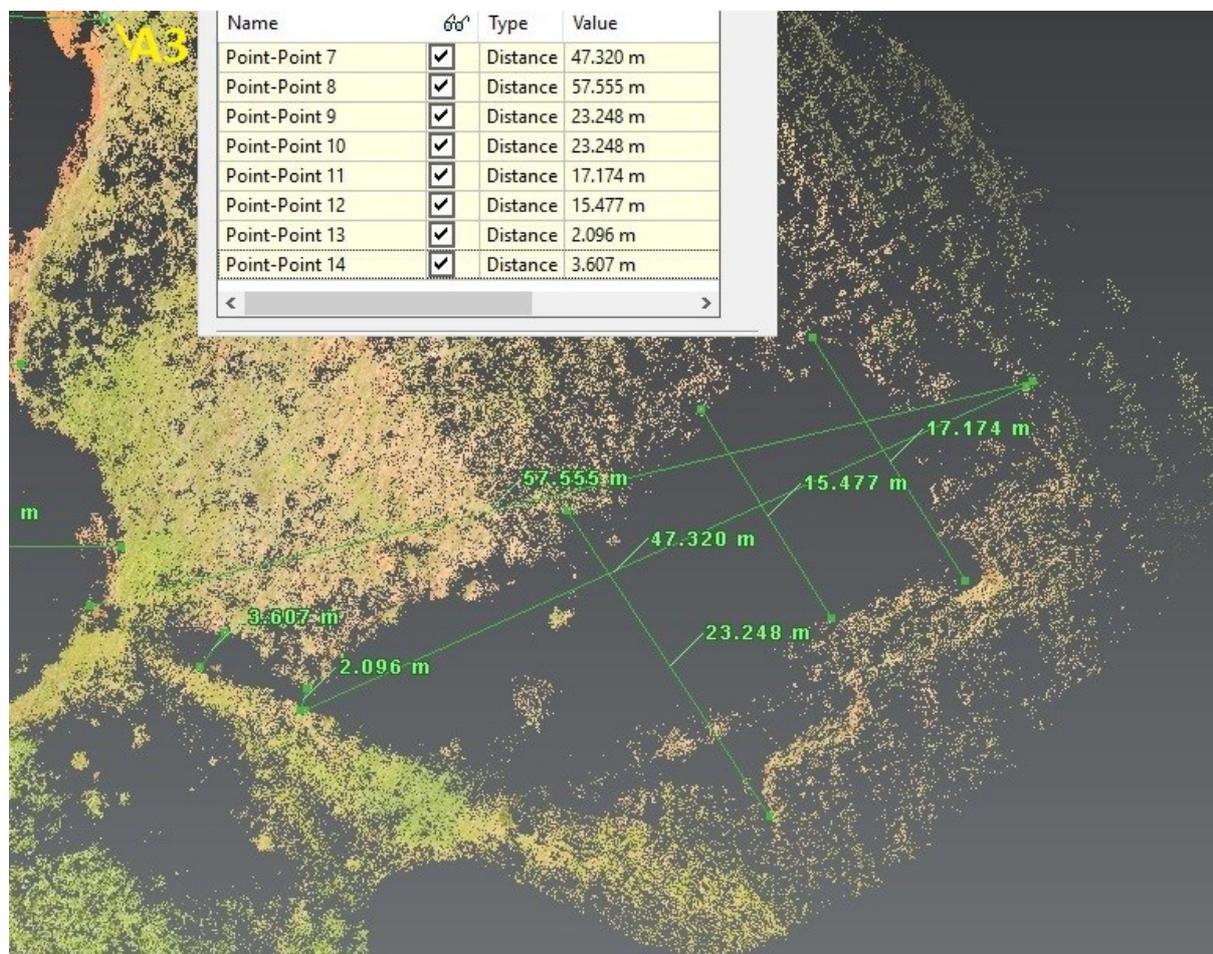


Figura 65 – Medição de seções da voçoroca Q. Números em verde correspondem aos respectivos transectos (*point-point*), de acordo com a tabela de mensurações. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).

Em termos qualitativos, a nuvem de pontos gerou imagens interessantes da voçoroca A, que ajudam a mostrar o potencial de detalhe do uso do *Laser Scanner* Terrestre (figura 66).

Um bom diagnóstico da erosão, composto por elementos quantitativos e qualitativos, faz uso imprescindível de fotografias de campo. Estas já foram trabalhadas para as demais voçorocas mapeadas na bacia do Alto rio Pirai. Mas a voçoroca com registro mais rico de fotos de campo é VA. Primeiro, por ser a mais estudada na presente pesquisa, com coletas de amostras de solo, uso de VANT em dois momentos (dezembro/2017 e março/2018) e varredura com LST (fevereiro/2018). A área de estudo secundária, VB, a cargo de comparação, não contou com escaneamento e com um segundo voo com VANT.

Além disso, VA foi a que se mostrou mais ativa, necessitando a tomada constante de fotos em campo. Nesse sentido, o VANT utilizado funcionou como uma máquina fotográfica aérea, produzindo fotografias de campo em ângulos privilegiados. Portanto, as imagens oriundas do modelo DJI Spark agregam qualitativamente à análise do presente estudo, pela alta resolução de pixels e as possibilidades de posicionamento, facilitando a exploração das áreas sem muito esforço físico em campo para tal.

A fotografia da cabeceira da voçoroca (figura 67) destaca a grande fenda no lado direito, por onde a água percorre preferencialmente desde a superfície da encosta, provocando subprocessos do voçorocamento, por exemplo, a erosão por queda d'água (*plunge pool erosion*) (LOUREIRO, 2013). A partir dela é perceptível que o lado direito de VA seja o mais ativo, pois recebe grandes quantidades de fluxos vindos por esse caminho superficial na encosta, que gera uma ravina acima da cabeceira e, também, pela conexão com VQ.

A realização de dois sobrevoos com VANT em período chuvoso foi extremamente importante para mostrar como grandes volumes de pluviosidade podem trazer prejuízos quando atingem voçorocas como VA. Nesse período chuvoso, entre dezembro de 2017 e março de 2018, foram realizados três trabalhos de campo fundamentais para os resultados obtidos nesta pesquisa, em termos de sensoriamento remoto. No 1º e no último destes campos foi utilizado o VANT, enquanto no 2º foi realizada a varredura com LST.

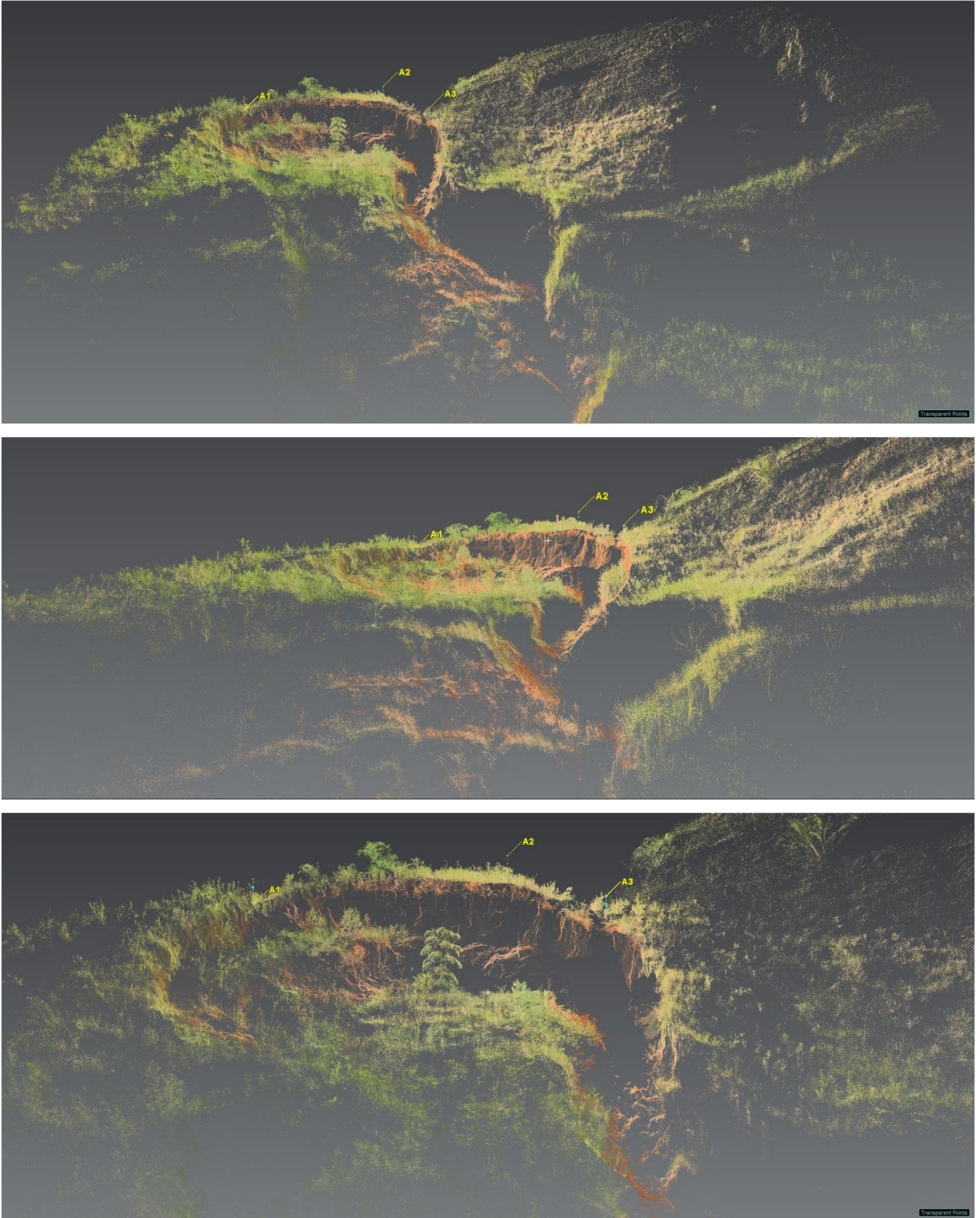


Figura 66 – Nuvem de pontos processada no *software Leica Cyclone*, visualizada no modo “pontos transparentes” por diferentes ângulos, conferindo imagens com bom nível de realismo, de representação fidedigna. Processamento: Hugo Alves S. Loureiro (2018).



Figura 67 – Fotografia aérea do VANT focalizando a cabeceira da voçoroca A, em dezembro de 2018. Seta destaca caminho preferencial da água. Foto: Fabrizio Garritano (2018).

Na véspera do trabalho de campo 27 de fevereiro de 2018, para escaneamento da voçoroca, houve a maior pluviosidade verificada pela pesquisa e impactos desta, desde o início dos estudos, em meados de 2016. Dados obtidos pelo portal **Hidroweb (Dados Telemétricos)**, da Agência Nacional de Águas (ANA) indicam um total de 95,6mm de chuva nas 36h que antecederam o trabalho de campo. Deste total, 57,8mm, ocorreu entre 19h e 22h de 26 de fevereiro de 2018. Vale ressaltar que, apesar da manutenção de um pluviógrafo na área da bacia, não houve registro justamente deste importante evento, devido à troca de lugar não comunicada do aparelho por parte da nova proprietária do local. Isto acarretou o não registro entre janeiro e março daquele ano. Assim, trabalhos futuros deverão utilizar os dados da ANA para análise da pluviosidade na área de estudo.

A consequência deste evento de chuva é visto claramente nas próximas imagens (figura 68). A mobilização e extravasamento de materiais erodidos sobre a estrada foi excepcional, não registrada desde o início das pesquisas de campo. Em março, de 2018, aproximadamente um mês após as fortes chuvas, a quantidade de material na estrada ainda era alarmante.

Fica ainda mais evidente ao serem comparadas imagens aéreas do VANT de dezembro de 2017 e março de 2018 que mostram parte da voçoroca A e parte da estrada (figura 69). Nota-se que é mantido certo estreitamento das faixas de rolamento devido ao acúmulo do material nas áreas de acostamento.

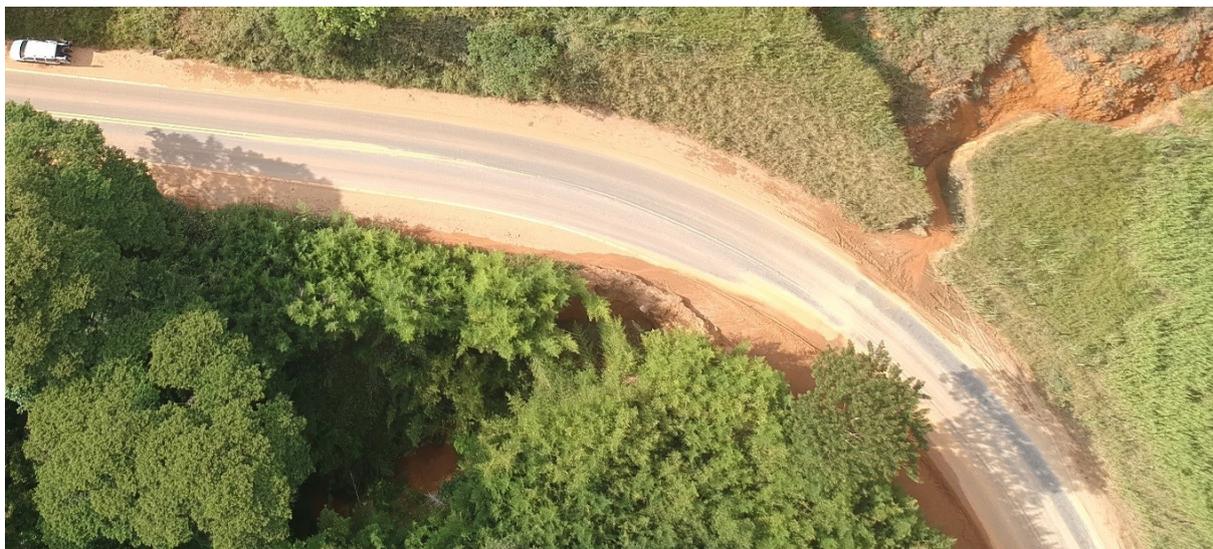


Figura 68 – Grande acúmulo de material erodido em fevereiro se mantém em março de 2018, ao longo das áreas de acostamento e de parte da pista próximo à saída da voçoroca. No canto superior esquerdo, Fiat Dobló da UFRJ serve de escala. Foto: Fabrizio Garritano (2018).



Figura 69 – Voçoroca A e RJ-155/BR-494 em dezembro de 2017 (à esquerda) e março de 2018 (à direita). Foto: Fabrizio Garritano (2017 e 2018).

Toda essa quantidade de material foi transportada em fortes chuvas, principalmente em 26 de fevereiro, véspera do trabalho de campo de varredura a laser com LST. As fotos deste campo (figuras 70, 71, 72 e 73) dão ainda maior dimensão dos efeitos adversos gerados. Segundo relatos de moradores e comerciantes da região, as chuvas e a quantidade de material chegaram a causar acidentes de trânsito no dia anterior ao trabalho de campo. Para a pesquisa em si, resultou na impossibilidade de acessar a voçoroca A por dentro com o LST, o que contribuiria sobremaneira com a qualidade da nuvem de pontos obtida.



Figura 70 – Faixa de rolamento no sentido Angra dos Reis completamente coberta por solo erodido da voçoroca A e acúmulo nos acostamentos. Foto: Diego Janoti Suarez (2018).



Figura 71 – Vista a partir da lateral esquerda da voçoroca A, com a estrada tomada de sedimentos. Foto: Diego Janoti Suarez (2018).



Figura 72 – Foto panorâmica mostra a saída da voçoroca junto à estrada RJ-155/BR-494 com visão impressionante da quantidade de material mobilizado e atrapalhando bastante a segurança da via. A calha de drenagem ficou soterrada. Foto: Diego Janoti Suarez (2018).



Figura 73 – Nota-se no solo o direcionamento dos fluxos. Foto: Diego Janoti Suarez (2018).

A varredura com LST captou o material acumulado no acostamento. Na figura 74, a parte superior impressiona pela altura do monte feito com os sedimentos erodidos, bem como com a espessura do material acima da faixa de rolamento. Enquanto na parte inferior é mostrada a parte correspondente ao material no acostamento do outro lado da estrada. Não foi objetivo aqui, mas seria possível calcular a quantidade de material acumulado.



Figura 74 – Superior: foto de março de 2018 mostra o grande acúmulo de solo erodido pela voçoroca A. Inferior: parte da nuvem de pontos mostrando os sedimentos acumulados na pista. Foto: Domyrique Santos (2018).

Assim, conclui-se o diagnóstico através de métodos laboratoriais e de sensoriamento remoto, cujos resultados mostram o potencial ofertado quando seus usos são feitos de forma complementar.

## **6. CONCLUSÕES**

Houve percalços ao longo da pesquisa, determinantes na construção desta tese. Mudanças de ordem científica, burocrática ou político-econômica. Era previsto o estudo nos municípios de Angra dos Reis ou Paraty (RJ), mas não foram encontradas voçorocas de origens ligadas ao uso agropecuário, senão diretamente pelo corte da Rodovia Rio-Santos (BR-101). Por contiguidade, Rio Claro foi selecionado. Entre os objetivos iniciais, reabilitar área de voçorocamento (ou parte), discutindo-se, entre outros, a seleção de espécies, considerada a proximidade a importantes Unidades de Conservação da Mata Atlântica, não pode ser realizada. Por questões imprevistas em termos burocráticos e financeiros. Até a situação político-econômica do Brasil refletiu, por exemplo, na crescente dificuldade em realizar trabalhos de campo. Não há nisso críticas ao PPGG, IGeo, ou à Universidade, que pelo contrário, sempre buscaram as melhores soluções e adequações a tais dificuldades.

Os resultados representam a necessidade de expor a tomadores de decisões (agentes públicos ou privados), opções disponíveis para monitorar e diagnosticar a erosão nas encostas. A contribuição está no debate de métodos manuais (pinos de erosão) e digitais, em diversas escalas, suas vantagens, desvantagens e sugestões. As análises de solo reforçaram a importância que tem na compreensão das condições do solo, de como este pode se comportar em diferentes situações. Mais do que isso, a correlação entre os fatores controladores é necessária. Por isso, devem compor os diagnósticos realizados e sempre abarcar o máximo possível de elementos analisados e inter-relacionados.

O uso do *Laser Scanner* Terrestre provou que, se utilizado em condições de campo favoráveis, é capaz de gerar dados diversos e fundamentais para o monitoramento e diagnóstico de voçorocas e ravinas. É preciso que se tenha em mente que são necessários, minimamente, três posições fora da feição erosiva, três posições no seu interior (se for uma voçoroca) e um segundo período para repetição da varredura, de modo que se possa fazer comparativos. Apesar de só terem sido possíveis três posições e um período de escaneamento, os resultados são considerados extraordinários, por apresentarem o potencial deste método. Os modelos gerados, suas imagens e, principalmente, os resultados quantitativos dizem muito a respeito do LST. Com varreduras completas e periodicidade, esperam-se resultados extremamente relevantes e de precisão.

Os resultados dos sobrevoos com VANT mostraram a qualidade de suas imagens e a possibilidade de caracterizar e diagnosticar qualitativamente as áreas e os processos atuantes. Seu uso foi bastante positivo na geração e análise de dados qualitativos. Contudo, o uso de VANT tem potencial, também, em termos quantitativos, em função do crescente avanço do seu desenvolvimento tecnológico. As imagens geradas para este estudo, sem os desejáveis atributos quantitativos, foram importantes até mesmo para complementação do processamento dos dados da varredura a laser.

No comparativo entre as duas técnicas, é perceptível a sua complementaridade, mas também, importantes diferenças. O LST fornece uma representação digital em milhões de pontos enquanto o VANT fornece uma fotografia aérea da área. O VANT, se possuir capacidade de coleta de dados de LiDAR, poderá ser uma técnica mais completa que o LST. Isto se deverá pela portabilidade de cada equipamento e pela capacidade destes em campo. O LST possui limitações verificadas nesta pesquisa, como a dependência das condições do terreno. Os vazios gerados por áreas não escaneadas na voçoroca A foram resultado imediato e inerente disso. Não era possível carregar e fixar o equipamento em solo encharcado e instável no interior da feição. Um VANT seria capaz de realizar a varredura em seu interior, porque não demandaria circulação sobre o terreno.

Já pinos e estacas (apenas exemplificados) podem auxiliar de modo didático, na transferência de conhecimento, possibilitando estimativas a serem comparadas aos produtos de sensoriamento remoto. Imagens de satélite de alta resolução do *Google Earth* e fotografias do *Google Street View*, ainda que desprovidos de precisão cartográfica, podem auxiliar de modo rápido e prático desde a visualização de feições erosivas, até a busca pelo histórico de uma área, através de séries temporais dos recursos de imagens históricas. Assim, é importante diferenciar que os Ortofotomosaicos do IBGE são melhores cartograficamente, enquanto o *Google Earth* é melhor visualmente.

Por fim, o problema verificado na delimitação da bacia do Alto rio Pirai, que demonstra provável erro na base cartográfica do IBGE, para esta área, merece avaliação posterior e, se confirmada, revisão dos mapeamentos em trabalhos futuros. Constitui um resultado importante, já que os erros fazem parte da pesquisa científica e em se tratando de bases antigas, sua revisão é sempre positiva. Os dados SRTM indicaram que a bacia em

estudo seria maior do que a base cartográfica oficial considera, com o que seria o rio do Braço extrapolando seus limites e nascendo no município de Bananal/SP, caracterizando-se, inclusive, como o rio de maior extensão da bacia hidrográfica.

Portanto, as sugestões e as conclusões desta pesquisa representam o que se espera de estudos experimentais científicos. Que tragam respostas e, ao mesmo tempo, novas perguntas e ideias. Espera-se, assim, a realização de artigos em periódicos e pesquisas de pós-graduação que venham dar continuidade às investigações realizadas. Abaixo se encontra uma ampla lista de sugestões para trabalhos futuros, a partir do modo como foram utilizados os métodos. Isto dará continuidade, melhorias e revisão aos resultados trabalhados:

**(1)** analisar possíveis influências da geologia da bacia do Alto rio Piraí, ou da bacia do rio Piraí como um todo, na ocorrência de processos erosivos lineares verificados no presente estudo. Cabe lembrar que a geologia da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul possui forte controle estrutural, o que pode ter refletância na geomorfologia da área de estudo;

**(2)** pesquisar sobre a relação, frequentemente observada, em estradas pavimentadas entre sistemas de drenagem pluvial e ocorrência de voçorocas. A erosão em estradas é mais comumente analisada em relação àquelas não pavimentadas. Há poucos estudos sobre estradas pavimentadas. Nestas, a presença de voçorocas chama a atenção quando atingem faixas de rolamento, comprometendo a segurança, e estão associadas, geralmente, com sistemas de drenagem de águas pluviais;

**(3)** conduzir estudos de erosividade nas áreas mapeadas, podendo servir para diagnósticos e prognósticos. Podem, ainda, compor análises referentes aos sistemas de drenagem e a erosão em estradas;

**(4)** considerar a importância fundamental da água no desenvolvimento e evolução dos processos erosivos, como a direção de fluxos nas encostas, capacidade de infiltração dos solos, condutividade hidráulica, umidade do solo, escoamento superficial e subsuperficial. Fatores que devem refinar o diagnóstico realizado;

**(5)** verificação de erros e correção nas bases cartográficas do IBGE para a bacia do Alto rio Piraí. Como mencionado, os resultados dos mapeamentos temáticos apontaram

inconsistências na área de divisa dos estados de Rio de Janeiro e São Paulo. Assim, faz-se necessário pesquisar sobre a situação e revisar os mapeamentos realizados;

**(6)** desenvolver novas pesquisas, refinando o uso do LST e a análise dos produtos que pode oferecer. Pode-se, por exemplo, realizar monitoramentos periódicos de feições erosivas e estabelecer os fluxos nas encostas;

**(7)** utilizando VANT de maior capacidade de geração de dados de sensoriamento remoto é possível avançar na compreensão e análise dos processos geomorfológicos. Estudos que comparem os mesmos tipos de produtos gerados pelo VANT e pelo LST podem indicar os melhores métodos para cada tipo de área ou de dado que se queira analisar;

**(8)** com o uso de geotecnologias variadas, realizar prognósticos de áreas suscetíveis à erosão linear. Utilizar desde imagens de satélite de alta resolução até nuvem de pontos de escaneamento a laser e imagens aéreas de VANT;

**(9)** realizar análises estatísticas de todos os dados das análises de solo, tornando os dados ainda mais confiáveis, bem como análises geoestatísticas, da distribuição dos fatores condicionantes da erosão, através de ambiente GIS;

**(10)** utilizar diferentes métodos de monitoramento de campo, manuais (pinos e estacas) e modernos (VANT e LST) para comparar seus resultados;

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABER, J.S.; RIES, J.B.; MARZOLFF, I. *Gully erosion monitoring* In: ALBER, J.S.; MARZOLFF, I.; RIES, J.B. Small-Format Aerial Photography. Elsevier B.V., 2010, p. 193-200.

ALBUQUERQUE, E.L.S.; SOUZA, M.J.N. de. Condições ambientais e socioeconômicas nas bacias hidrográficas costeiras do setor leste metropolitano de Fortaleza, estado do Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, V. 09, N° 01, pp. 110-124, 2016.

ALMEIDA, H.S. de. Diversidade de ácaros edáficos e minhocas em área de integração lavoura pecuária no centro oeste do Rio Grande do Sul. Dissertação (mestrado). UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Agrobiologia, RS, 2016. 68 p.

ALMEIDA-FILHO, G. S. Controle de erosão. *Fundações & Obras Geotécnicas*, v. 5, p. 66-77, 2015.

ANDRADE, Aluísio Granato de; TAVARES, Sílvio Roberto de Lucena; COUTINHO, Heitor Luiz da Costa. Contribuição da serrapilheira para recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.24, n.220, p.55-63, 2003.

ANDRADE, A.G. de; PORTOCARRERO, H.; CAPECHE, C.L. Práticas Mecânicas e Vegetativas para Controle de Voçorocas. Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2005. 4p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico 33).

ANDRADE, Gilberto Fugimoto de; SANCHEZ, Gabriela Fernandez; ALMEIRA, Josimar Ribeiro de. Monitoramento e avaliação em Projetos de Recuperação de Áreas Degradadas. *Revista Internacional de Ciências*, v. 4, n° 2, jul/dez, pp. 13-26, 2014.

ANTONELI, V.; BEDNARZ, J.A.; THOMAZ, E.L. Produção de sedimento em caminhos de animais em sistema faxinal na região centro-sul do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n° 3, pp. 311-322, 2012.

AQUINO, A.M. de; CORREIA, M.E.F.; ALVES, M.V. Biodiversidade da macrofauna edáfica no Brasil. In: MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. (Orgs.). Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros. Lavras: UFLA, 2008, p. 143-170.

ARAÚJO, G.H.S.; ALMEIDA, J.R.; GUERRA, A.J.T. *Gestão ambiental de áreas degradadas*. 4ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

ARAÚJO, G. H. de S.; ALMEIDA, J. R. de; GUERRA, A. J. T. *Gestão Ambiental de Áreas Degradadas*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.

ASSOULINE, S.; BEN-HUR, M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena*, v. 66, p.211 – 220, 2006.

AVANZI, J.C.; NORTON, L.D.; SILVA, M.L.N. CURI, N.; SILVA, M.A. Aggregate stability in soils cultivated with eucalyptus. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 46:89-96, 2011.

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

BARBOSA, M.S. Petrografia das Unidades de Mapeamento da Folha São Fidélis (1:100.000), Centro-Norte do Estado do Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009.

BARTLEY, R.; HAWDON, A.; POST, D.A.; ROTH, C.H. A sediment budget for a grazed semi-arid catchment in the Burdekin basin, Australia. *Geomorphology*, 87, p. 302-321, 2007.

BARTZ, M.L.C.; BROWN, G.G.; SOUZA JÚNIOR, I.G.; COSTA, A.C.S. Micronutrientes em coprólitos de minhocas produzidos em um Latossolo Vermelho Distroférrico sob diferentes sistemas de manejo. XXXI CBCS – Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Anais... Gramado, Rio Grande do Sul, 2007. 5p.

BENAVIDES-VARELA, C.; SAMPER-VILLARREAL, J.; CORTÉS, J. Cambios en la cobertura de manglares em Bahía Culebra, Pacífico Norte de Costa Rica (1945-2010). *Revista de Biología Tropical*, v. 64 (3), p. 955-964, 2016.

BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. Piracicaba: Livro ceres, 1985.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 7.ed. São Paulo, Ícone, 2010. 355p.

BLAIKIE, P. e BROOKFIELD, H. Defining and debating the problem. In: BLAIKIE, P. e BROOKFIELD, H. (Orgs.). *Land degradation and society*. London: Methuen & Co. Ltd, 1987. p. 1-26.

Boardman J, Favis-Mortlock D T. 2014. The significance of drilling date and crop cover with reference to soil erosion by water, with implications for mitigating erosion on agricultural land in South East England. *Soil Use Manage*. **30**: 40–47.

BOARDMAN, J.; FAVIS-MORTLOCK, D.; FOSTER, I. A 13-year record of erosion on badland sites in the Karoo, South Africa. *Earth Surf. Process. Landforms*, v.40, p.1964–1981, 2015.

BOARDMAN, J. The value of Google Earth™ for erosion mapping. *Catena* 143, p. 123-127, 2016.

BONILLA, C.A.; VIDAL, K.L. Rainfall erosivity in Central Chile. *Journal of Hydrology*, 410, 2011, p. 126-133.

BONILLA, C.A.; JOHNSON, O.I. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*, p.116–123, 2012.

BONILLA, E.A.F. *Terrestrial Laser Scanning study of gully erosion at West Bijou Creek, Arapahoe Conty, Colorado: an investigation on field acquisition and data processing*. Disponível em: [https://www.unavco.org/highlights/2008/tls2008\\_summer\\_project-report.pdf](https://www.unavco.org/highlights/2008/tls2008_summer_project-report.pdf). acesso em: 20 de julho de 2018.

BOTELHO, R.G.M. e SILVA, A.S. (2007). Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: *Reflexões sobre a geografia física no Brasil*. Antonio Carlos Vitte, Antonio Jose Teixeira Guerra (orgs) – 2ª ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 153-192, 2007.

BRADBURY, J.; CULLEN, P.; DIXON, G.; PEMBERTON, M. Monitoring and management of streambank erosion and natural revegetation on the Lower Gordon River, Tasmanian Wilderness World Heritage Area, Australia. *Environmental Management*, 19, n° 2, pp. 259-272, 1995.

BRADY, N.C. *Natureza e propriedades dos solos* - "The nature and properties of soils". Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo. 7ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BREMER, M., SASS, O., 2012. Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. *Geomorphology* 138, 49–60.

BRONICK, C.J.; LAL R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, v.124, p.3 –22, 2005.

BROWN, G.G.; NIVA, C.C.; ZAGATTO, M.R.G.; FERREIRA, S. de A.; NADOLNY, H.S.; CARDOSO, G.B.X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G. de A.; PASINI, A.; BARTZ, M.L.C.; SAUTTER, K.D.; THOMAZINI, M.J.; BARETTA, D.; SILVA, E. da; ANTONIOLLI, Z.I.; DECAËNS, T.; LAVELLE, P.M.; SOUSA, J.P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, E.B. de; BROWN, G.G.; PRADO, R.B. (eds.). *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do bioma Mata Atlântica*. EMBRAPA Florestas, Brasília, DF, p. 122-154, 2015.

BROWN, G.G.; DOMÍNGUEZ, J. Uso das minhocas como bioindicadoras ambientais: principais práticas – o 3º Encontro Latino Americano de Ecologia e Taxonomia de Oligoquetas (Elaetao3). *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.) Número Especial 2, p. 1-18, 2010.

CAIRES, E.F. *Correção da acidez do solo em sistemas de plantio direto*. Piracicaba - SP: International Plant Nutrition Institute (INPI), 2013. 13p.

CARDOSO DA SILVA, L.F.T.; GUERRA, A.J.T. Avaliação da suscetibilidade à erosão ao longo da RJ-165 (Estrada Paraty-Cunha) através da análise das propriedades físico-químicas dos solos. *Revista Geonorte*, v. 6, n. 25, 2015, p. 1-23.

CARVALHO FILHO, A; LUMBRERAS, J. F.; SANTOS, R. D.; *Os Solos do Estado do rio de Janeiro*. Brasília: CPRM, 2001.

CARVALHO FILHO, A. DE; LUMBRERAS, J.F.; WITTERN, K.P.; LEMOS, A.L.; SANTOS, R.D. DOS; CALDERANO FILHO, B.; CALDERANO FILHO, S.B.; OLIVEIRA, R.P.; AGLIO, M.L.D.; SOUZA, J.S. DE; CHAFFIN, C.E. *Mapa de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 2003. 1 Mapa, color. Escala 1:250.000. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/sigweb.html>. Acessado em 18 de junho de 2012.

CASADO, A.P.B.; HOLANDA, F.S.R.; ARAÚJO FILHO, F.A.G.; YAGUIU, P. Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco (perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba – SE). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26, p. 231-239, 2002.

CASTELO BRANCO, M.R. *Pagamento por serviços ambientais: da teoria à prática*. Rio Claro (RJ): ITPA, 2015. 188p.

CASTILLO, C.; JAMES, M.R.; REDEL-MACÍAS, M.D.; PÉREZ, R.; GÓMEZ, J.A. SF3M software: 3-D photo-reconstruction for non-expert users and its application to a gully network. *Soil*, v.1, p.583–594, 2015.

CASTILLO, C.; GÓMEZ, J.A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, v.160, p.300–319, 2016.

CASTRO, U.N.; NEVES, S.R.A.; SILVA, L.F.T.C., MENDES, S.P.; GUERRA, A.J.T. Mapeamento de feições erosivas e cicatrizes de escorregamento por unidades de relevo na sub-bacia hidrográfica do rio Sana (Macaé – RJ). *Revista de Geografia*, v. especial, n. 3, 2010.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, pp. 527-538, 1998.

CASTRO FILHO, C. et al. Aggregate stability under different soil management systems in a redlatosol in the state of Parana, Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 65, n. 1, p. 45-51, 2002.

CESÁRIO, F. V.; DONAGEMMA, G. K. ; Ruiz, H.A ; BALIEIRO, F. C. . Estabilidade de agregados em água: análise crítica e padronização. *Comunicado Técnico (Embrapa-Solos)*, v. 57, p. 1, 2010.

CHAMIZO, S.; RODRÍGUEZ-CABALLERO, E.; CANTÓN, Y.; ASENSIO, C.; DOMINGO, F. Penetration resistance of biological soil crusts and its dynamics after crust removal: Relationships with runoff and soil detachment. *Catena*, v.126, p.164–172, 2015.

CHEN, X.-y.; ZHAO, Y.; MI, H.-x.; MO, B. Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. *Catena*, 136, pp. 135-140, 2016.

CHORLEY, R.J.; SCHUMM, S.A.; SUDGEN, D.E. *Geomorphology*. University Press, Cambridge. 605p., 1984.

COELHO, F.M.; AZEVEDO, J.P.S. de; JÚNIOR, I.V. Análise multicritério de propostas para a melhoria da qualidade da água captada para abastecimento da Região Metropolitana oeste do Rio de Janeiro. In: TUBBS FILHO, D.; ANTUNES, J.C.O.; VETTORAZZI, J.S. (Orgs.) *Bacia Hidrográfica dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim/Comitê da Bacia Hidrográfica Guandu*. Rio de Janeiro: INEA, 2012. pp. 61-77.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. (Orgs.). *Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos*. 7ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 93-148.

COELHO NETO, A.L.; SATO, A.M.; AVELAR, A. de S.; VIANNA, L.G.G.; ARAÚJO, I.S.; FERREIRA, D.L.C.; LIMA, P.H.; SILVA, A.P.A.; SILVA, R.P. January 2011: the extreme landslide in Brazil. Second World Landslide Forum. Proceedings... Roma, Itália, 6p., 2011.

COOKE, R.U. & DOORNKAMP, J.C. *Geomorphology in environmental management: a new introduction*. Second Edition. Oxford: Clarendon Press, 1990.

COOPETEC. Fundação COPPETEC – Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente. *Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul – Resumo*. Diagnóstico dos recursos hídricos. Relatório Final. AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. 2006. 201p.

CORREIO, R. C. M.; BARP, A.R.B. Inovações metodológicas para construção de cenários estratégicos em bacias hidrográficas. *RAI – Revista de Administração e Inovação*, São Paulo, v. 11, n° 3, pp. 200-226, 2014.

COSTA, A. de O.; SALGADO, C.M.; DINALI, Y.T. Caracterização da precipitação no médio vale do rio Paraíba do Sul Fluminense (RJ). *Revista Geonorte*, Edição Especial 2, v. 2, n. 5. P. 1000-1013, 2012.

COUPER, P.; STOTT, T.; MADDOCK, I. Insights into river bank erosion processes derived from analysis of negative erosion-pin recordings: observations from three recent UK studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, p. 59-79, 2002.

CUNHA, S.B. Geomorfologia Fluvial. In: CUNHA, S.B. e GUERRA, A.J.T. (Orgs.). *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 157-189.

CUNHA, S. B. e GUERRA, A.J.T. Degradação ambiental. In: GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. (Orgs.). *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. p.337-380.

CUNHA, L.; BROWN, G.G.; STANTON, D.W.G.; DA SILVA, E.; HANSEL, F.A.; JORGE, G.; McKEY, D.; VIDAL-TORRADO, P.; MACEDO, R.S.; VELASQUEZ, E.; JAMES, S.W.; LAVELLE, P.; KILLE, P.; TERRA PRETA DE ÍNDIO NETWORK. Soil Animals and Pedogenesis: the role of earthworms in anthropogenic soils. *Soil Science*, v. 181, n. 3/4, p. 110-125, 2016.

DANTAS, M. E. Mapa geomorfológico. *Projeto Rio de Janeiro*. Folha SF 23-Z-A/C Volta Redonda/Ilha Grande. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Rio de Janeiro, 2000. 1 mapa.

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; MEDINA, A. I. M.; SILVA, C. R. da; PIMENTEL, J.; LUMBRERAS, J. F.; CALDERANO, S. B.; CARVALHO FILHO, A. de. *Diagnóstico geoambiental do Estado do Rio de Janeiro*. Repositório Institucional de Geociências: Produção Científica, Trabalhos apresentados em eventos, 2005. 35p. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/644>. Acessado em: 28 de março de 2018.

DANTAS, M.E.; COELHO NETTO, A.L. A denudação antropogênica da paisagem: processos erosivodepositivos no médio Vale do Rio Paraíba do Sul. In: OLIVEIRA, R.R. de; RUIZ, A.E.L. (Orgs.). *Geografia histórica do café* [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio, 2018. p. 107-126.

DENG, Y.; SHEN, X.; XIA, D.; CAI, C.; DING, S.; WANG, T. Soil erodibility and physicochemical properties of collapsing gully alluvial fans in Southern China. *Pedosphere*, 29 (1), 2019, p. 102-113.

DEVIDE, A.C.P. História ambiental do Vale do Paraíba. UFRRJ. Qualificação de doutorado. Pós-Graduação em Fitotecnia. 2013. 23p. Disponível em: [http://orgprints.org/24815/1/HISTORIA\\_AMBIENTAL\\_VALE\\_DO\\_PARAIBA.pdf](http://orgprints.org/24815/1/HISTORIA_AMBIENTAL_VALE_DO_PARAIBA.pdf). Acesso em: 22 de junho de 2019.

DIAS, J.C. e LIMA, W.N. Comparação de métodos para a determinação de matéria orgânica em amostras ambientais. *Revista Científica da UFPA*, Pará, v.4, 16 p., 2004. Disponível em: [http://www2.ufpa.br/rcientifica/ed\\_anteriores/pdf/ed\\_04\\_jcd.pdf](http://www2.ufpa.br/rcientifica/ed_anteriores/pdf/ed_04_jcd.pdf); acessado em 18 de julho de 2012.

D'OLEIRE-OLTMANN, S., MARZOLFF, I., PETER, K., RIES, J., 2012. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4, 3390–3416.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Orgs.). *Manual de métodos de análise de solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

DONAGEMA, G. K.; MACEDO, J.R. de; PRADO, R.B.; SCHULER, A.E.; RANGEL, L. de A.; BALIERO, F. de C.; FONTANA, A.; CESÁRIO, F.V. Índices de agregação e carbono nos agregados em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos de Trajano de Moraes – RJ. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 18 p.

DOS SANTOS PEREIRA, L. Análises físico-químicas de solos com distintas coberturas vegetais e processos hidroerosivos em área degradada na bacia do rio Maranduba – Ubatuba, São Paulo. *Dissertação de Mestrado*. PPGG-UFRJ, Rio de Janeiro. 117p., 2015.

ELTNER, A., BAUMGART, P., MAAS, H.-G., FAUST, D. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 741–755, 2015.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; GALLIASSI, K.; CERETTA, C.A. Determinação de matéria orgânica do solo pela perda de massa por ignição, em amostras do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.31, p. 247-255, 2007.

ETCHELAR, C.B. Processos Erosivos em Áreas Úmidas, APA do Banhado Grande – RS. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. 2017- Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS.

FANNING, P. Long-term contemporary erosion rates in an arid rangelands environment in western New South Wales, Australia. *Journal of Arid Environments*, 28, p. 173-187, 1994.

FAO; ITPS. *Status of the World's soil resources (SWSR) – main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and intergovernmental Technical Panel of Soils, Rome, Italy, 2015. 650p.

FAVIS-MORTLOCK, D.T.; GUERRA, A.J.T. The implications of general circulation model estimates of rainfall for future erosion: a case study from Brazil. *Catena*, v.37, p.329–354, 1999.

FERRAZ, S. R.; SOUZA F. S. e REIS L.L.M. 2016. Laser Scanner Terrestre: teoria, aplicações e prática. *Revista Brasileira de Geomatica*, v.4, n. 2, p.99-109.

FERREIRA, R.Y. Cadastro, diagnóstico e recuperação das áreas verdes públicas urbanas de Criciúma/SC. *Revista Tecnologia e Ambiente*, v. 21, nº 1, pp. 284-296, 2015.

FITZ, P.R. *Geoprocessamento sem complicação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

FLORENZANO, T.G. *Iniciação em sensoriamento remoto*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FRANCISCO, B. A.; NUNES, J. O. R. Análise da dinâmica espaço-temporal do processo de voçorocamento através de pesquisas de campo no município de Rancharia-SP. 2009. Disponível em: [http://docs.fct.unesp.br/cursos/geografia/CDROM\\_IXSG/Anais%20-%20PDF/Alyson%20Bueno%20Francisco.pdf](http://docs.fct.unesp.br/cursos/geografia/CDROM_IXSG/Anais%20-%20PDF/Alyson%20Bueno%20Francisco.pdf). Acesso em: 09 de jul. 2018.

FREITAS, D.F. de; CERQUEIRA JÚNIOR, E.P. de; SILVA, E.F. da; CRUZ, E. S.; DANTAS, J.S.; LIMA, F.G.F. Características químicas de minhocas produzidos em Cambissolo no Semiárido Pernambucano. XXXV CBCS – Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Anais... Natal, Rio Grande do Norte, 2015. 4p.

FULLEN, M.A. e CATT, J.A. *Soil Management: problems and solutions*. London: Arnold, 2004.

FURLANI, S.; NINFO, A. Is the present the key to the future? *Earth-Science Reviews*, v.142, p.38–46, 2015.

GAO P. Rill and Gully Development Processes. In: John F. Shroder (ed.) *Treatise on Geomorphology*, Volume 7, pp. 122-131. San Diego: Academic Press, 2013.

GARCÍA-RUIZ, J.M.; BEGUERÍA, S.; NADAL-ROMERO, E.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C.; LANARENAULT, N.; SANJUÁN, Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, v.239, p.160–173, 2015.

GARRITANO, F. do N.; LOUREIRO, H.A.S.; SANTOS, D. da S.; GUERRA, A.J.T. Mapeamento da erosão: análise e caracterização de uma voçoroca através do uso de imagens aéreas obtidas com *drone*. II *Internacional Workshop Art and Science*. Rio de Janeiro – RJ. Anais... 12p., 2018a.

GARRITANO, F. do N.; LOUREIRO, H.A.S.; SANTOS, D. da S.; MARTINS, V.; GUERRA, A.J.T. Monitoramento, mapeamento e caracterização de voçoroca através de imagens do *Google Earth Pro* e uso de *drone*. IV Jornada de Geotecnologias do Estado do Rio de Janeiro/ organização: Gustavo Mota de Sousa; et al. Anais [recurso eletrônico]... Seropédica, RJ. p. 83-93, 2018b.

GARRITANO, F. do N.; GUERRA, A.J.T.; FULLEN, M.A. Unmanned Aerial Vehicle for monitoring gully erosion in Rio de Janeiro State. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 21, EGU2019-11416-1, 2019. Disponível em: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/presentations/garritano>. Acessado em: 11 de maio de 2019.

GERRARD, A.J. *Mountain environments: an examination of the Physical Geography of mountains*. London: Belhaven Press, 1990.

GERRARD, J. *Soil geomorphology - an interaction of pedology and geomorphology*. Chapman e Hall, 1992.

GÓMEZ-GUTIÉRREZ, A.; SCHNABEL, S.; BERENGUER-SEMPERE, F. Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion. *Catena*, v.120, p.91–101, 2014.

GOODWIN, N.R.; ARMSTON, J.; STILLER, I.; MUIR, J. Assessing the repeatability of terrestrial laser scanning for monitoring gully topography: A case study from Aratula, Queensland, Australia. *Geomorphology*, v.262, p.24–36, 2016.

GOUDIE, A. The human impact in geomorphology – 50 years of change. *Geomorphology*, <http://doi.org/10.106/j.geomorph.2018.12.002>.

GOZUBUYUK, Z.; SAHIN, U.; OZTURK, I.; CELIK, A.; ADIGUZEL, M.C. Tillage effects on certain physical and hydraulic properties of a loamy soil under a crop rotation in a semi-arid region with a cool climate. *Catena*, v.118, p.195–205, 2014.

GROHMAMM, F. Porosidade. In: MONIZ, A. C. (Org.) *Elementos de pedologia*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. p. 77-84.

GU, C.; MU, X.; GAO, P.; ZHAO, G.; SUN, W.; TATARKO, J.; TAN, X. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 2019, p. 716-728.

GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: CUNHA, S.B. e GUERRA, A.J.T. (Orgs.). *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 139-155.

\_\_\_\_\_. O início do processo erosivo. In: *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Orgs.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005a. p. 17-56.

\_\_\_\_\_. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo: FFLCH-USP, 16, p. 32-37, 2005b. Disponível em: <<http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/50/0>> Acesso em: 27 jul. 2012.

\_\_\_\_\_. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. (Orgs.). *Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos*. 7ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 149-209.

\_\_\_\_\_. Degradação dos solos – conceitos e temas. In: GUERRA, A.J.T. e JORGE, M.C.O. (Orgs.). *Degradação dos solos no Brasil*. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 2014. p.15-50.

\_\_\_\_\_. *Erosão dos solos e movimentos de massa: abordagens geográficas*. Curitiba: CRV, 2016. 222p.

GUERRA, A.J.T. e MARÇAL, M.S. *Geomorfologia Ambiental*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

GUERRA, A.J.T. e JORGE, M. C. O. Geomorfologia Aplicada ao Turismo. In: Raphael de Carvalho Aranha, Antonio Jose Teixeira Guerra. (Org.). *Geografia Aplicada ao Turismo*. 1ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, pp. 56-77, 2014.

GUERRA, A.J.T. e MENDONÇA, J.K.S. Erosão dos Solos e a Questão Ambiental. In: *Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil*. A.C. Vitte e A.J.T.Guerra. (orgs). Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, pp 225-256, 2007.

GUERRA, A.J.T.; BEZERRA, J.F.R.; FULLEN, M.A.; MENDONÇA, J.K.S.; JORGE, M.C.O. The effects of biological geotextiles on gully stabilization in São Luís, Brazil. *Natural Hazards*, 2015, 14p.

GUERRA, A.J.T.; FULLEN, M.A.; JORGE, M. do C.O.; ALEXANDRE, S.T. Soil erosion and conservation in Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, Vol. 37, nº 1, pp. 81-91, 2014.

GUERRA, A.J.T.; FULLEN, M.A.; JORGE, M.C.O.; BEZERRA, J.F.R.; SHOKR, M.S. Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. *Pedosphere*, v.27(1): p.27–41, 2017.

GUO, Q.; HAO, Y.; LIU, B. Rates of soil erosion in China: A study based on runoff plot data. *Catena*. V.124, p.68–76, 2015.

GUSAROV, A.; GOLOSOV, V.; IVANOV, M.; SHARIFULLIN, A. Influence of relief characteristics and landscape connectivity on sediment redistribution in small agricultural catchments in the forest-steppe landscape zone of the Russian Plain within European Russia. *Geomorphology*, 327, 2019, p. 230-247.

HAIGH, M.J. *Evolution of slopes on artificial landforms*. Blaenavon, U.K.: Research Paper – University of Chicago, Department of Geography; no. 183, 1978.

HAO, H.; WANG, J.; GUO, Z.; HUA, L. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow. *Catena*, 173, 2019, p. 494-504.

HANCOCK, G.R.; LOWRY, J.B.C. Hillslope erosion measurement – a simple approach to a complex process. *Hydrological Processes*, 29, pp. 4809-4816, 2015.

HARVEY, A.M. Process interactions, temporal scales and the development of hillslope gully systems: Howgill Fells, northwest England. *Geomorphology*, v.5, p.323-344, 1992.

HOOKE, J.M. An analysis of the processes of river bank erosion. *Journal of Hydrology*, 42, p. 39-62, 1979.

HOYOS, N.; WAYLENA, P.R.; JARAMILLO, A.I. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, v.314, p.177–191, 2005.

HU, S.; QIU, H.; PEI, Y.; CUI, Y.; XIE, W.; WANG, X.; YANG, D.; TU, X.; ZOU, Q. ; CAO, P.; CAO, M. Digital terrain analysis of a landslide on the loess tableland using high-resolution topography data. *Landslides*. Technical Note. 16p., 2018.

HUBER, R.; SOUZA, B.S.P. Estudo da fragilidade do relevo-solo através da resistência á penetração de estaca em argissolos e neossolos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.14, n.3, p.269-277, 2013.

HUANG, D. Quantifying stream bank erosion and deposition rates in a Central U.S. urban watershed. *Thesis for the degree Master of Science*. University of Missouri-Columbia, 2012. 160p.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual técnico de pedologia* / IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2ª ed. – Manuais técnicos em geociências, nº 4. Rio de Janeiro: IBGE, 2005. 300p.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual técnico de pedologia* / IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2ª ed. – Manuais técnicos em geociências, nº 4. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual técnico de geomorfologia*. IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. – Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p.

INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Plano de Manejo do Parque Estadual Cunhambebe. 2015. Disponível em: [http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter\\_dibap/documents/document/zwew/mt e0/~edisp/inea0114643.pdf](http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_dibap/documents/document/zwew/mt e0/~edisp/inea0114643.pdf). Acesso em: 30 jan. 2016.

INSTITUTO TERRA. Instituto Terra de Preservação Ambiental. Estudos Técnicos para a criação de UCs. Instituto Terra – Instituto Estadual de Florestas (IEF) – Aliança para Conservação da Mata Atlântica – The Nature Conservancy (TNC) – Prefeitura Municipal de Rio Claro (PMRC). 2008. Disponível em: [https://issuu.com/itpa/docs/estudo\\_para\\_cria\\_o\\_do\\_pe\\_cunhambebe\\_e\\_apa\\_alto\\_pi](https://issuu.com/itpa/docs/estudo_para_cria_o_do_pe_cunhambebe_e_apa_alto_pi) Acesso em: 23 de maio de 2018.

IRELAND, H.A.; SHARPE, C.F.S.; EARGLE, D.H. Principles of gully erosion in the Piedmont of South Carolina. *U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin*, 633, pp.142, 1939.

JAMES, M.R.; CASTILLO, C.; PÉREZ, R.; TAGUAS, E.V.; GÓMEZ, J.A.; QUINTON, J.N. Determining gully volume from straightforward photo-based 3D reconstruction. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 14, EGU2012-4597, 2012. Disponível em: [https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2012/poster\\_programme/9895](https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2012/poster_programme/9895). Acesso em: 18 de julho de 2018.

JAKŠÍK, O.; KODEŠOVÁ, R.; KUBIŠ, A.; STEHLÍKOVÁ, I.; DRÁBEK, O.; KAPIČKA, A. Soil aggregate stability within morphologically diverse areas. *Catena*, 127, pp. 287-299, 2015.

JIANG, F.; ZHAN, Z.; CHEN, J.; LIN, J.; WANG, M.; GE, H. Rill erosion processes on a steep coluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain. *Catena*, 169, 2018, p. 46-58.

JORGE, M. C. O. & GUERRA, A. J. T. Erosão dos solos e movimentos de massa: recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. *In: Processos Erosivos e Recuperação de Áreas Degradadas*. Editora: Oficina de Textos. São Paulo, 2013.

JORGE, M.C.O. Potencial geoturístico e estratégias de Geoconservação em trilhas situadas na região sul do município de Ubatuba-SP. Tese (doutorado). UFRJ. PPGG. Rio de Janeiro, 2017. 223 p.

JUNQUEIRA, A. A; LIMA, L. G. S.; SOUZA, J. P. de; SILVA, C. E. S. da; KNUPP, R. O.; BASSO, V. M. Avaliação do projeto Produtores de Água e Floresta da bacia do rio Guandu – RJ. 6º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade – Anais, p. 47-56, 2017.

KAISER, A.; NEUGIRG, F.; ROCK, G.; MÜLLER, C.; HAAS, F.; RIES, J.; SCHMIDT, J. Small-Scale Surface Reconstruction and Volume Calculation of Soil Erosion in Complex Moroccan Gully Morphology Using Structure from Motion. *Remote Sensing*, v.6, p.7050-7080, 2014.

KAŠANIN-GRUBIN, M.; VERGARI, F.; TROIANI, F.; SETA, M.D. The role of lithology: parent material controls on badland development. *In: NADAL-ROMERO, E.; MARTÍNEZ-MURILLO, J.F.; KUHN, N.J. (Eds.). Badland dynamics in the context of Global Change*. Elsevier, 2018, p. 61-110.

KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, v.154, p.398–406, 2010.

KHALIQ, A.; ABBASI, M.K. Improvements in the physical and chemical characteristics of degraded soils supplemented with organic–inorganic amendments in the Himalayan region of Kashmir, Pakistan. *Catena*, 126, 209-219, 2015.

KIEHL, E.J. *Manual de Edafologia: relações solo-planta*. 1.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

KIRKBY, M.J. e MORGAN, R.P.C. (Eds.) *Soil Erosion*. John Wiley & Sons, 1980.

KNAPEN, A.; POESEN, J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. *Earth surfate processes and landforms*, v.35, p.217–228, 2010.

KOCIUBA, W., KUBISZ, W., ZAGÓRSKI, P., 2014. Use of terrestrial laser scanning (TLS) for monitoring and modelling of geomorphic processes and phenomena at a small and medium spatial scale in polar environment (Scott River—Spitsbergen). *Geomorphology* 212, 84–96.

KOITER, A.J.; OWENS, P.N.; PETTICREW, E.L.; LOBB, D.A. The role of soil surface properties on the particle size and carbon selectivity of interrill erosion in agricultural landscapes. *Catena*, 153, p. 194-206, 2017.

KOOCH, Y.; SANJI, R.; TABARI, M. The effect of vegetation change in C and N contents in litter and soil organic fractions of a Northern Iran temperate forest. *Catena*, 178, 2019, p. 32-39.

KRENZ, J.; KUHN, N. Assessing badland sediment sources using Unmanned Aerial Vehicles. *In: NADAL-ROMERO, E.; MARTÍNEZ-MURILLO, J.F.; KUHN, N.J. (Eds.). Badland dynamics in the context of Global Change*. Elsevier, 2018, p. 255-276.

LABRIÈRE, N.; LOCATELLI, B.; LAUMONIER, Y.; FREYCON, V.; BERNOUX, M. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. V.203, p.127–139, 2015.

LAMEIRA, A.B.; RENNO, C; MOTTA, H.F.; LOPES, L.A.C.; MENEGON, M.; OLIVEIRA, R.S. de; BARCELLOS, T.B.C.; ZAINER, N.G.; PRADO, R.B. Diagnóstico e alternativas para a recuperação ambiental na bacia hidrográfica do rio Guandu (BHRG) – RJ. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. 72p. Modo de acesso: <http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/publicacao.html>.

LAWLER, D.M. and LEEKS, G.J.L. River bank erosion events on the Upper Severn detected by the Photo-Electronic Erosion Pin (PEEP) system. *In: Erosion and Sediment Transport*

Monitoring Programmes in River Basins (*Proceedings of the Oslo Symposium, August 1992*). IAHS Publ. n° 210, 1992.

LAWLER, D.M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, p. 777-821, 1993.

\_\_\_\_\_. The importance of high-resolution monitoring in erosion and deposition dynamics studies: examples from estuarine and fluvial systems. *Geomorphology*, 64, p. 1-23, 2005.

LEPSCH, I. F. *19 lições de Pedologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LI, Z.; ZHANG, Y.; ZHU, Q.; HE, Y.; YAO, W. Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, v.228, p.462–469, 2015.

LI, T.; LI, S.; LIANG, C.; HE, B.; BUSH, R. Erosion vulnerability of sandy clay loam soil in Southwest China: modeling soil detachment capacity by flume simulation. *Catena*, 178, 2019, p. 90-99.

LIMA, Luiz Dias da Mota. Suscetibilidade à Erosão dos Solos nas Sub-bacias do médio e alto cursos da Bacia do Rio Macaé / RJ. Instituto de Geociências – UFRJ. M.S.c., Programa de Pós-graduação em Geografia. *Dissertação de Mestrado* – Universidade Federal do Rio de Janeiro/PPGG. 127p, 2008.

LIMA, L. D. M.; SILVEIRA, P.G.; SILVA, F.F.; LOUREIRO, H. A. S. Estudo dos Processos Erosivos no Médio e Alto Cursos da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé, Macaé/RJ. *Geografia. Ensino & Pesquisa (UFSM)*, Santa Maria, v. 12, p. 000-000, 2008. *Meio digital*.

LIMA, R. N. de S. Google Earth aplicado à pesquisa e ensino da geomorfologia. *Revista de Ensino de Geografia*, Uberlândia, v. 3, n. 5, p. 17-30, 2012.

LOBO, Camila Fernandes. Desempenho produtivo e econômico de novilhos Nelore em fase de recria em pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, sob suplementação proteico-energética e mineral na época das águas. *Dissertação de mestrado* (em Ciências Animais). Brasília. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Brasília – UNB. 67p, 2012.

LOBO, G. P.; BONILLA, C. A. Predicting soil loss and sediment characteristics at the plot and field scales: model description and first verifications. *Catena*, 172, 2019, p. 113-124.

LONGHITANO, G.A.; MANTOVANI, J.C.; BELTRÃO, S.R.B. As contribuições associadas ao uso de VANTs para monitoramento da evolução de processos erosivos em Sonora-MS. Disponível em: [http://docs.fct.unesp.br/eventos/ypss/temp/P4\\_YPSS\\_2016\\_Juliana\\_Mantovani.pdf](http://docs.fct.unesp.br/eventos/ypss/temp/P4_YPSS_2016_Juliana_Mantovani.pdf). Acessado em 25 de julho de 2018.

LOUREIRO, Hugo Alves Soares. Suscetibilidade dos Solos à Erosão na Sub-bacia Hidrográfica do Rio das Flores – Nova Friburgo/RJ. *Monografia de Graduação em Geografia*. UFRJ. Rio de Janeiro. 53p, 2010.

\_\_\_\_\_. Monitoramento e diagnóstico de áreas degradadas na bacia hidrográfica do rio São Pedro (RJ): estudos experimentais em voçoroca e utilização de geotêxteis de fibra de bananeira. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGG, 2013, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

LOUREIRO, H.A.S.; NEVES, S.R.A.; BRIZZI, R.R.; MENDES, S.P.; GUERRA, A.J.T. Soil Erodibility and Monitoring at a Gully in São Pedro River's Drainage Basin, Macaé Municipality/Rio de Janeiro State – Brazil. UGI 2011 – Regional Geographic Conference, Conference Proceedings, Santiago - Chile, 2011.

LOUREIRO, H.A.S.; SANTOS, D.S.; SUAREZ, D.J.; GARRITANO, F.N.; MOLINARO, Y.T.; PEPE, H.S.; NUNES, D.V.S.; GONÇALVES, J.B.; GUERRA, A.J.T.; ANDRADE, A.G. Erodibilidade das camadas superficiais do solo em encostas com voçorocamento – bacia hidrográfica do rio Piraí, município de Rio Claro (RJ). 12° SINAGEO, Paisagem e Geodiversidade, Crato/CE. Anais... 2018. 10 p.

LOUREIRO, H.A.S. e FERREIRA, S. M. O Papel das geotecnologias no estudo de feições erosivas e de movimentos de massa no Brasil. In: GUERRA, A.J.T. e JORGE, M.C.O. (Orgs.). *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. São Paulo. Oficina de Textos, 2013. p.95-125.

LOUREIRO, H.A.S.; GUERRA, A.J.T. Monitoramento de voçorocas: adaptações metodológicas no uso de estacas e pinos de erosão. Anais do IX Simpósio Nacional de Geomorfologia – SINAGEO, Rio de Janeiro, 6p, 2012.

LOUSADA, G.; FERNANDES, M. do C. Avaliação da precisão vertical de modelos digitais de elevação e análise de tendência em diferentes domínios geomorfológicos. *Revista Brasileira de Cartografia*, nº 69/7, p. 1263-1276, 2017.

LUBBERS, I.M.; van GROENIGEN, K.J.; FONTE, S.J.; SIX, J.; BRUSSAARD, L.; van GROENIGEN, J.W. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms. *Nature Climate Change*, vol. 3, p. 187-193, 2013.

LUFFMAN, I.E.; NANDI, A.; SPIEGEL, T. Gully morphology, hillslope erosion, and precipitation characteristic in the Appalachian Valley and Ridge province, southeastern USA. *Catena*, 133, p. 221-232, 2015.

MA, R.; LI, Z.; CAI, C; WANG, J. The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China). *Catena*, v. 121, 2014, p. 279-287.

MADARI, B.E. Procedimento para uma Estimativa Compartimentada do Seqüestro de Carbono no Solo. Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2004. 10p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico 22).

MARCHIORO, E.; OLIVEIRA, J.C. Evolução espaço-temporal de voçorocas às margens da rodovia ES-482 em Alegre (ES). *Revista Geonorte*, Edição Especial 4, v. 10, n. 1, p. 125-130, 2014.

Marden, M., Arnold, G., Seymour, A., Hambling, R., 2012. History and distribution of steepland gullies in response to land use change, East Coast Region, North Island, New Zealand. *Geomorphology* 153–154, 81–90.

MARION, F.A.; SANTOS, E.B.; HENDGES, E.R.; ANÁLISE DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA MODELAGEM DO RELEVO NO MUNICÍPIO DE FRANCISCO BELTRÃO – PR. *Revista Geografia Acadêmica*, v. 9, n. 2, 2015, p. 50-60.

MARQUES, J.S. Ciência geomorfológica. In: CUNHA, S.B. e GUERRA, A.J.T. (Orgs.). *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 103-138.

MARZOLFF, I.; POESEN, J. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology*, v.111, p.48–60, 2009.

MEDEIROS, J. C.; CARVALHO, M. C. S. e FERREIRA, G. B. Embrapa Algodão Sistemas de Produção. ISSN 1678-8710. 2006. Disponível em: [http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoIrrigado\\_2ed/index.html](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoIrrigado_2ed/index.html). Acessado em: 19 fevereiro 2019.

MENDES, S. P. Diagnóstico Geotécnico e Sócio-Ambiental da Voçoroca do Bacanga, São Luís – MA. Monografia para obtenção do bacharelado em Geografia – UFRJ: Rio de Janeiro, 2007, 58p.

MIKLÓS, A.A. de W. Biogênese do solo. *Revista do Departamento de Geografia – USP*, Volume Especial 30 Anos, p. 190-229, 2012.

MOMM-SCHULT, S.I.; FREITAS, S.R.; PASSARELLI, S.H.; Uso urbano e serviços ecossistêmicos em áreas protegidas: o caso do Parque Guaraciaba em Santo André (SP). *Anais III APPURBANA*, Belém, 16p., 2014.

MONDAL, A., KHARE, D., KUNDU, S., Uncertainty analysis of soil erosion modelling using different resolution of open-source DEMs. *Geocarto International*, 32, 334–349, 2017a.

MONDAL, A., KHARE, D., KUNDU, S., MUKHERJEE, S., MUKHOPADHYAY, A., MONDAL, S., Uncertainty of soil erosion modelling using open source high resolution and aggregated DEMs. *Geoscience Frontiers*. 8, 425–436, 2017b.

MONSERRAT, O., and CROSETTO, M., 2008, Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 63, pp. 142-154.

MORAES, J.M. Geologia do granito Silva Jardim (RJ). Implicações na evolução tectônica dos terrenos Oriental e Cabo Frio. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 65f, 2009.

MORAES, M. V. A. Monitoramento e avaliação de processos erosivos marginais em reservatórios de usinas hidrelétricas por meio de varredura a laser. Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Dissertação de mestrado em Ciências Cartográficas. 96 p, 2016.

MORGAN, R.P.C. *Soil Erosion and Conservation*. 3<sup>rd</sup> edition. England: Blackwell Publishing, 2005.

MOTA, I.S.de A. Avaliação da erosão marginal e transporte de sedimentos na sub-bacia do Riacho Fundo – Distrito Federal. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGG, 2001, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

MUSHI, C.A.; NDOMBA, P.M.; TRIGG, M.A.; TSHIMANGA, R.M.; MTALO, F. Assessment of basin-scale soil erosion within the Congo River Basin: a review. *Catena*, 178, 2019, p.64-76.

NACINOVIC, M.G.G.; MAHLER, C.F.; AVELAR, A. de S. Soil erosion as a function of different agricultural land use in Rio de Janeiro. *Soil & Tillage Research*, 144, 2014, p. 164-173.

NADAL-ROMERO, E., REVUELTO, J., ERREA, P., LÓPEZ-MORENO, J.I. The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands area (central Spanish Pyrenees). *SOIL* 1, 561–573, 2015. <https://doi.org/10.5194/soil-1-1-2015>.

NADAL-ROMERO, E.; GARCÍA-RUIZ, J.M. Rethinking spatial and temporal variability of erosion in badlands. In: NADAL-ROMERO, E.; MARTÍNEZ-MURILLO, J.F.; KUHN, N.J. (Eds.). *Badland dynamics in the context of Global Change*. Elsevier, 2018, p. 217-254.

NASCIMENTO, D. T. F.; ROMÃO, P. A.; SILVA, S. B.; SALES, M. M.; VARGAS, C. A. L. e LUZ, M. P. Emprego do google earth no cadastramento de processos erosivos lineares e laminares. *Cartografía y tecnologías de la información geográfica*, 2013, 15p.

NAVES SILVA, M.L.; CÂNDIDO, B.M.; BATISTA, P.V.G.; QUINTON, J.N.; JAMES, M.R. Modelagem 3D da superfície do solo a partir de imagens obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2015.

NETTO, J. V. P.; BORGES, E. N.; PASSOS, R. R.; GONTIJO, I.; SILVA, C. A. Influencia do manejo sobre a estabilidade de agregados em solo de Cerrado sob Cafeicultura. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. *Anais...* Brasília, DF: Embrapa Café, 2002.

NEUGIRG, F., STARK, M., KAISER, A., VLACILOVA, M., DELLA SETA, M., VERGARI, F., SCHMIDT, J., BECHT, M., HAAS, F. Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys. *Geomorphology*. 269, 8–22, 2016.

NEVES, S.R. de A. Diagnóstico de degradação dos solos por erosão no médio curso da sub-bacia do rio São Pedro – Macaé (RJ). *Monografia para obtenção do bacharelado em Geografia* – UFRJ: Rio de Janeiro. 71p, 2011.

\_\_\_\_\_. Análise prognóstica de processos erosivos na bacia hidrográfica do rio Mateus Nunes (Paraty, RJ). *Dissertação de Mestrado, UFRJ*. Rio de Janeiro, 130p., 2015.

NEVES, S.R. de A.; GUERRA, A.J.T.; NUNES, G.F. dos R.; SILVA, M.A.P. da. A erodibilidade dos solos no médio e baixo curso da bacia hidrográfica do rio Mateus Nunes (Paraty, RJ). XVI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. *Anais...* 7 p., 2015.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil*, 76:319-337, 1984.

Ochoa, P., Fries, A., Mejía, D., Burneo, J., Ruíz-Sinoga, J., Cerdà, A., Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena* 140, 2016, p.31–42.

OLIVEIRA, M.A.T. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Orgs.). *Erosão e Conservação dos Solos – Conceitos, Temas e Aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p. 57-99.

OLIVEIRA, D. de. Técnicas de Pedologia. In: VENTURI, L. A. B. (org.). *Geografia: práticas de campo, laboratório e sala de aula*. Editora Sarandi: São Paulo, 2011, p. 83-106.

OLIVEIRA, P.T.S.; WENDLAND, E.; NEARING, M.A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. *Catena*, v.100, p.139–147, 2012.

OUYANG, W.; WU, Y.; HAO, Z.; ZHANG, Q.; BU, Q.; GAO, X. Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development. *Science of the Total Environment*, p.798–809, 2018.

PAIVA, R. F. da P. de S.; COELHO, R. C. O Programa Produtor de Água e Floresta de Rio Claro/RJ enquanto ferramenta de gestão ambiental: o perfil e a percepção ambiental dos produtores inscritos. UFPR, *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 33, p. 51-62, abril 2015.

PANAGOS P, BALLABIO C, MEUSBURGER K, SPINONI J, ALEWELL C, BORRELLI P. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. *Journal of Hydrology* 548: 251–262, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.006>. Acesso em 25 jan. 2018.

PANTOJA, L. M. A importância do radar de visada lateral na cartografia da Amazônia Brasileira: um estudo de caso na Serra do Acaraí – PA. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Cartográfica e Agrimensura. UFRPA. 2018. 60 p.

PALMER, J.A.; SCHILLING, K.E.; ISENHART, T.M.; SCHULTZ, R.C.; TOMER, M.D. Streambank erosion rates and loads within a single watershed: bridging the gap between temporal and spatial scales. *Geomorphology*, 209, pp. 66-78, 2014.

PEIXOTO, M. N. O.; CARMO, I. O. ; MOURA, J. R. S.; BARBOSA, D. R.; MONTANHA, A. C. F. E. . Distribuição espacial de seqüências sedimentares cenozóicas associadas a superfícies erosivas/deposicionais no médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). In: Simpósio de Geografia Física Aplicada, 7, 1997, Curitiba. Anais. Curitiba: UFPR, 1997. v. 1. p. 517.

PENTEADO, M.M. *Fundamentos de geomorfologia*. 2ª edição. Rio de Janeiro: IBGE, 1978. 180p.

PEPLER, M.C.; FITZPATRICK, A. Methods for monitoring the effects of grazing management on bank erosion and channel morphology, Fever River, Pioneer Farm, Wisconsin, 2004. In: USGS Fact Sheet: 2005-3134. 2005, 4p. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/2005/3134/>> Acesso em: 08 ago. 2012.

PEREIRA, A. A.; THOMAZ, E. L. Estabilidade de agregados em diferentes sistemas de uso e manejo no município de Reserva – PR. *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 7, n. 2, p. 378-387, 2014.

PEREIRA, L. dos S. Análises físico-químicas de solos com distintas coberturas vegetais e processos hidroerosivos em área degradada na bacia do rio Maranduba – Ubatuba, São Paulo. Dissertação de Mestrado. PPGG-UFRJ. Rio de Janeiro, 2015, 117p.

PEREIRA, L. dos S.; JORGE, M. do. C. O.; RODRIGUES, A.M.; GUERRA, A. J. T. Contribuição das chuvas de baixa intensidade nos processos erosivos superficiais em ambiente degradado. XVI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada- Anais, 2015.

PEREIRA, L. DOS. S.; RODRIGUES, A.M.; JORGE, M. DO. C. O.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M.A. Processos hidro-erosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.17, n.2, p.299-316, 2016.

PEREIRA, H. L.; CATALUNHA, M.J.; BORGES JÚNIOR, C.R.; SOUZA, P.T.G. Qualidade de modelos digitais de elevação utilizando dados do SIGEF: Estudo de caso para as sub-bacias do Ribeirão dos Mangues e Rio Soninho no estado do Tocantins. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 1, p. 187-200, 2019.

PÉREZ, E.; GARCÍA, P. Monitoring soil erosion by raster images: from aerial photographs to drone taken pictures. *European Journal of Geography*, v.7, n.5, p.117- 129, 2017.

PERROY, R.L., BOOKHAGEN, B., ASNER, G.P., CHADWICK, O.A. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. *Geomorphology*, 118, pp. 288-300, 2010.

PLENNER, S.; EICHINGER, W.E.; BETTIS, E.A. Simple Terrestrial Laser Scanner for Measuring Streambank Retreat. *J. Hydraul. Eng.*, 6.p, v.142, 2016. (Technical Note, 2016).

PODWOJEWSKI, P.; POULENARD, J.; NGUYET, M.L.; ROUW, A.; NGUYET, V.T.; HA PHAM, Q. Climate and vegetation determine soil organic matter status in an alpine inner-tropical soil catena in the Fan Si Pan Mountain, Vietnam. *Catena*, v.87, p. 226-239, 2011.

POESEN, J.; NACHTERGAELEA, J.; VERSTRAETENA, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, v.50, p.91– 133, 2003.

POESEN, J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.43, p.64–84, 2018.

POPE, I.C.; ODHIAMBO, B.K. Soil erosion and sediment fluxes analysis: a watershed study of the Ni Reservoir, Spotsylvania County, VA, USA. *Environ. Monit. and Assess.*, 186, pp. 1719-1733, 2014.

PORTELA, J; C; COGO, N. P.; BAGATINI, T.; CHAGAS, J. P. e PORTZ, G. Restauração da estrutura do solo por sequências Culturais implantadas em semeadura direta, e sua Relação com a erosão hídrica em distintas Condições físicas de superfície. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 1, p.1353-1364, Viçosa, 2010.

PORTOCARRERO, H. Monitoramento Hidrológico em Voçoroca Submetida a práticas de RAD: Morro do Radar, Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão/Antônio Carlos Jobim. Distrito Federal. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGG, 2004, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

PORTOCARRERO, H.; ANDRADE, A.G. DE.; CAMPOS, T.M.P.DE.; FERNANDES, N.F. Aspectos Hidrológicos e Mecânicos da Vegetação na Estabilidade de Taludes e Encostas Naturais. Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2006. 41p. (Embrapa Solos. Documento 88).

PRETI, F.; TAROLLI, P.; DANI, A.; CALLIGARO, S.; PROSDOCIMI, M. LiDAR derived high resolution topography: the next challenge for the analysis of terraces stability and vineyard soil erosion. *Journal of Agricultural Engineering*, v. XLIV(s2), 2013.

PRUSKI, F. F. Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2.ed. atual. e ampl. – Viçosa: Ed. UFV, 2009. 279p.

PULLEMAN, M.; CREAMER, R.; HAMER, U.; HELDER, J.; PELOSI, C.; PÉRÈS, G.; RUTGERS, M. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services: an overview of European approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 4, n. 5, p. 529-538, 2012.

RAMOS, J. A. S. ; LOBATO, R. B. ; CABRAL, J. G. C. . *Análise Espacial de Bacias Hidrográficas com ArcGIS 10*. Labgis Extensão. UERJ Centro de Produção, 2011. 79p.

RAMOS, D. A. L.; AGUIAR, F. R. de; VILLELA, L. E. O projeto Produtores de Água e Floresta em Rio Claro-RJ: uma análise da governança no projeto sob a ótica da gestão social. *O Social em Questão*, Ano XIX, nº 36, p. 177-196, 2016.

RANGEL, L. de A. O Impacto da utilização de trilhas na área de proteção ambiental de Cairuçu- Paraty- Rio de Janeiro. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGG-Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. Avaliação da trilha Sahy-Rubião no Parque Estadual Cunhambebe em Mangaratiba (RJ). Monografia (Curso de Especialização) – Escola Nacional de Ciências Estatísticas – ENCE. Análise Ambiental e Gestão do Território. Rio de Janeiro, 2016. 103p.

RANGEL, L. de A.; GUERRA, A.J.T. Degradação de trilhas na Reserva Ecológica da Juatinga em Paraty – Rio de Janeiro. *Revista Ambiente e Água*, vol. 9, n. 4, 2014.

RANGEL, L. de A.; GUERRA, A.J.T. Qualidade física de um cambissolo háplico sob diferentes usos na bacia do córrego dos Micos, Paraty (RJ). *Bol. Goia. Geogr. (Online)*, v. 37, n. 1, p. 91-105, 2017.

RANGEL, L. de A.; GUERRA, A.J.T. Caracterização de atributos do solo de trilhas ecoturísticas em unidades de conservação do município de Paraty (RJ). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.19, n.1, p.17-31, 2018a.

RANGEL, L. de A.; GUERRA, A.J.T. Microtopografia e compactação do solo em trilhas geoturísticas no litoral do Parque Nacional da Serra da Bocaina- Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.19, n.2, p.391-405, 2018b.

RANGEL, L. de A.; JORGE, M.do.C.O.; GUERRA, A.J.T.; MICHAEL FULLEN, M.F. Geotourism and Soil Quality on Trails Within Conservation Units in South-East Brazil. *Geoheritage*, 11.p, 2019.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*, p.29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; GUBIANI, P. I.; KAISER, D. R.; MINELLA, J. P. G.; REINERT, D. J. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG: SBCS, 2011.

RENZ, V.D.; RITTER, L.G.; CONCEIÇÃO, S.R. da; GARLET, G.; HASS, A. Delimitação e monitoramento vegetativo da bacia hidrográfica do Lajeado Chiquinha. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET*. UFSM, Santa Maria, V. 18, nº 1, pp. 172-177, 2014.

ROCHA, R. S. 2002. Exatidão cartográfica para cartas digitais urbanas. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Tese de doutorado em Engenharia de Produção. 128p

RODRIGUES, A.A. Uso de veículos aéreos não tripulados para mapeamento e avaliação de erosão urbana. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2016, Universidade Federal de Goiás- UFG.

RODRIGUES, A.M. Diagnóstico da degradação do solo de taludes de corte na bacia hidrográfica do rio Maranduba – Ubatuba/SP. *Dissertação de Mestrado*, UFRJ. Rio de Janeiro, 104p., 2016.

RODRIGUES, A.M.; RANGEL, L. de A.; PEREIRA, L. dos S.; JORGE, M. do C. O.; GUERRA, A.J.T.; SANTOS FILHO, R. D. dos. Qualidade do solo em Unidades de Conservação: Parque Estadual da Serra do Mar e Parque Nacional da Serra da Bocaina. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo (CBCS). Anais... Natal/RN, 2015, 4p.

ROSS, J.L.S. & FIERZ, M.S.M. Algumas Técnicas de Pesquisa em Geomorfologia. In: Venturi, L.A.B. (org.) *Praticando Geografia – técnicas de campo e laboratório*. Organizador: Editora Oficina de Textos, São Paulo, 2ª edição, 2009. p.69-84.

SÁ, M.A.C.; LIMA, J.M. de; SILVA, M.L.N.; DIAS JÚNIOR, M. de S. Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. [online]. 2000, v. 35, n. 9, pp. 1825-1834.

SAADAT, H.; ADAMOWSKI, J.; TAYEFI, V.; NAMDAR, M.; SHARIFI, F.; ALE-EBRAHIM, S. A new approach for regional scale interrill and rill erosion intensity mapping using brightness index assessments from medium resolution satellite images. *Catena*, v.113, p.306–313, 2014.

SALOMÃO, F.X.T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Orgs.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p. 229-267.

SANTOS, O.C.de O. Análise do uso do solo e dos recursos hídricos na microbacia do igarapé Apéu, nordeste do Estado do Pará. Dissertação de mestrado . Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGG, 2006, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

SANTOS, E.E. dos.; FARIA, A.L.L. de. Mapeamento e monitoramento de processos erosivos a partir de imagens Ikonos: Um estudo de caso da área urbana do Município de Queluzito (MG). Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba-PR, 2011, INPE p.5716.

SANTOS, M. dos. Uso, ocupação da terra e dinâmica fluvial da bacia hidrográfica do córrego Cachoeirinha no município de Cáceres - Mato Grosso. *Dissertação de mestrado*. Universidade do Estado do Mato Grosso (UNEMAT), 2013, 150p.

SANTOS, R.C.; GUERRA, A.J.T.; NUNES, G.F. dos R. Avaliação da erodibilidade dos solos em encostas na zona de amortecimento do Parque Nacional da Serra da Bocaina: estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Pequeno, Paraty – RJ. II Simpósio Mineiro de Geografia (SINGEO). Anais... Juiz de Fora, Minas Gerais, 2016. p. 1110-1124.

SANTOS, R.C. Avaliação da erosão dos solos na bacia hidrográfica do rio Pequeno, Paraty – RJ. Dissertação (mestrado). UFRJ. PPGG. Rio de Janeiro, 2017. 140 p.

SANTOS FILHO, R.D. dos; SANTOS, R.D. dos; GUERRA, A.J.T.; JORGE, M. do C.O. Solos, ambiente e sociedade: subsídios pedológicos ao Geoturismo em Paraty, Rio de Janeiro. *Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 4p., 2015.

SATO, A.M.; ABDALAD, M. de A.; SILVA, A.P. de A.; AVELAR, A. de S.; COELHO NETTO, A.L. Bacia experimental do rio Sesmarias (médio vale do rio Paraíba do Sul): influência do eucalipto nos processos hidrológicos e erosivos. II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade. Anais... Taubaté, Brasil, 2009, IPABHi, p. 415-422.

SAXTON, N.E.; OLLEY, J.M.; SMITH, S.; WARD, D.P.; ROSE, C.W. Gully erosion in sub-tropical south-east Queensland, Australia. *Geomorphology*, 173-174, pp. 80-87, 2012.

SAYNOR, M.J.; ERSKINE, W.D.; EVANS, K.G. Bank erosion in the Ngarradj catchment: Results of erosion pin measurements between 1998 and 2001. *Supervising Scientist Report 176*, Supervising Scientist, Darwin NT. 2003.

SAYNOR, M.J. and ERSKINE, W.D. Spatial and temporal variations in bank erosion on sand-bed streams in the seasonally wet tropics of northern Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, p. 1080-1099, 2006.

SELBY, M.J. *Earth's changing surface: an introduction to geomorphology*. 5<sup>th</sup> ed. Oxford: Oxford University Press, 1991.

SELBY, M.J. *Hillslope materials and processes*. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Oxford University Press, 1993.

SICAR. Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural. Disponível em: <http://www.car.gov.br/#/>. Acesso em 10 de agosto de 2018.

SIDLE, R.C.; GOMI, T.; USUGA, J.C.L.; JARIHANI, B. Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedons to catchments. *Earth-Science Reviews*, 175, 2017, p. 75-96.

SILVA, T.M. A estruturação geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro. *Tese de Doutorado*. Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGG. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 264p, 2002.

\_\_\_\_\_. Geomorfologia do estado do Rio de Janeiro: distribuição espacial das feições morfológicas e contexto evolutivo. In: *Questões metodológicas e novas temáticas na pesquisa geográfica*. BICALHO, A.M.S.M. e GOMES, P.C.C. (Orgs.). Rio de Janeiro: Publit, 2009. p. 227-248.

SILVA, A.M. e. Processamento digital de imagens de satélite. Curso do Centro de Eventos da PUCRS - 07 a 12 de outubro de 2001. Porto Alegre - RS. Disponível em: <[www.cartografia.org.br](http://www.cartografia.org.br)>. Acesso em: dezembro de 2011.

SILVA, G.T.A. Voçorocas no Médio Paraíba: padrões de ocorrência e potenciais impactos. Dissertação (mestrado). UFRRJ. Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais – Conservação da Natureza. Seropédica – RJ. 2013. 79 p.

SILVA, L.F.T.C. da. Análise da suscetibilidade à erosão ao longo da RJ-165 (Estrada Paraty-Cunha). *Dissertação de Mestrado*, PPGG/UFRJ. Rio de Janeiro, 109p. 2014.

SILVA, V.P. Apropriação do território e meio ambiente: uma leitura geográfica. *Geoconexões*, Ano 1, Vol. 2, pp. 14-22, 2015.

SILVA, LUIZ CARLOS DA E CUNHA, HÉLIO CANEJO DA SILVA. Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro. Brasília: CPRM. 2ª edição revista, 2001.

SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Degradação dos Solos no Estado do Rio de Janeiro. In: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. *Degradação dos Solos no Brasil*. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 2014. p. 258-286.

SILVA, L.F.T.; GUERRA, A.J.T. Avaliação da suscetibilidade à erosão ao longo da RJ-165 (Estrada Paraty-Cunha) através da análise das propriedades físico-químicas dos solos. *Revista Geonorte*, v. 6, n. 25, 2015, p. 1-23.

SILVA, J.R.; JUNIOR, L.R.; FERREIRA, M.E.; VIEIRA, P.A. Análise Morfométrica do Perímetro Urbano de Goiás/Rio Vermelho com Dados obtidos por VANT's. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 2015, João Pessoa-PB. Anais... João Pessoa, 2015, p.2309-2316.

SILVA NETO, L. de F.; SILVA, I. de F. da; INDA, A.V.; NASCIMENTO, P.C. do; BORTOLON, L. Atributos físicos e químicos de agregados pedogênicos e de coprólitos de minhocas em diferentes classes de solos da Paraíba. *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 34, n. 6, p. 1365-1371, 2010.

SILVEIRA, C.P.L.; SILVA, R.S.; STRIEDER, G.; LIMA, L. da S.C.; SCHERER, V.S.; BONCZYNSKI, R.G.; BARTELS, G.K.; MILANI, I.C.B.; SUZUKI, L.E.A.S. Fatores controladores das perdas de solo por

erosão hídrica nas margens do arroio Pelotas. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH*, pp. 1-8, 2013.

SILVÉRIO, P.F. e GONÇALVES, C. Influência dos métodos de determinação de carbono orgânico em solos nos estudos de qualidade da água subterrânea e de avaliação de risco. *Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - Natal, 2008*. 11p.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, v.79, p.7–31, 2004.

SLATTON, K.C., CARTER, W.E., SHRESTHA, R.L., DIETRICH, W.E. Airborne Laser Swath Mapping: achieving the resolution and accuracy required for geosurficial research. *Geophys. Res. Lett.* 34, L23S10, 2007.

SLAYMAKER, O. Mountain hazards. *In: Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. I.Alcántara-Ayala e A. Goudie (orgs.). Cambridge University Press, 33-47, 2010.

SMETS, T.; POESEN, J.; BHATTACHARYYA, R.; FULLEN, M.A.; SUBEDI, M.; BOOTH, C.A.; KERTÉSZ, A.; SZALAI, Z.; TOTH, A.; JANKAUSKAS, B.; JANKAUSKIENE, G.; GUERRA, A.; BEZERRA, J.F.R.; ZHENG YI; PANOMTARANICHAGUL, M.; BÜHMANN, C.; PATERSON, D.G. Evaluation of biological geotextiles for reducing runoff and soil loss under various environmental conditions using laboratory and field plot data. *Land Degradation & Development*, March 2011, 22, p. 480-494, 2011.

SOARES, M.R.G. de J.; SOUZA, J.L.M. de. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Pequeno em São José dos Pinhás (PR). *Revista Geografia (Londrina)*, v. 21, n. 1, p. 19-36, 2012.

SOLÉ-BENET, A.; AFANA, A.; CANTÓN, Y. Erosion pins, profile and laser scanners for soil erosion monitoring in active hillslopes in badlands of se Spain. XII Reunión Nacional de Geomorfología, Santander 2012.

SPERANDIO, H.V.; CECÍLIO, R.A.; CAMPANHARO, W.A.; DEL CARO, C.F.; HOLLANDA, M.P. Avaliação da erosão hídrica pela alteração na superfície do solo em diferentes coberturas vegetais de uma sub-bacia hidrográfica no Município de Alegre, ES. *Semina: Ciências Agrárias*, 33, pp. 1411-1418, 2012.

STÖCKER, C., ELTNER, A., KARRASCH, P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry – a case study from Andalusia, Spain. *Catena* 132, 1–11, 2015.

STOCKING, M. Measuring land degradation. *In: BLAIKIE, P. e BROOKFIELD, H. (Orgs.). Land degradation and society*. London: Methuen & Co. Ltd, 1987. p. 49-63.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. *Geological Society of America Bulletin*, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.

SUAREZ, D. J.; LOUREIRO, H.A.S.; GUERRA, A.J.T. Erosão por voçorocas em estradas pavimentadas: formas de uso de geotecnologias para diagnósticos e monitoramentos. *Semana de Integração Acadêmica Da UFRJ, 2018. Anais...* 2018.

SUERTEGARAY D.M.A.; NUNES, J.O.R. A natureza da geografia física na geografia. *Terra Livre*, São Paulo, n.17, p. 11-24, 2001.

TAROLLI, P., ARROWSMITH, J.R., VIVONI, E.R. Understanding earth surface processes from remotely sensed digital terrain models. *Geomorphology* 113, 1–3, 2009.

TAROLLI, P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, v.216, p.295–312, 2014.

TAVARES, S.R.L.; MELO, A.S.; ANDRADE, A.G.; ROSSI, C.Q.; CAPECHE, C.L.; BALIEIRO, F.C.; DONAGEMMA, G.K.; CHAER, G.M.; POLIDORO, J.C.; MACEDO, J.R.; PRADO, R.B.; FERRAZ, R.P.D.; PIMENTA, T.S. *Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação*. 1ª edição. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008.

TEDESCO, A. Delimitação de Voçoroca com Imagens com Alta Resolução e ALS por Meio de Árvore de Decisão e Geobias. Tese de doutorado. Programa de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas- 2015, Universidade Federal do Paraná- UFPA.

TEIXEIRA, M.B.; CAMARGO, P.L.; MARTINS JÚNIOR, P.P.M. Uso das Imagens de Sensores Remotos para Análise Crítica da Degradação do Cerrado no Alto Médio São Francisco – Minas Gerais. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 41 (1), p. 245-254, 2018.

TISDALL, J. M., & OADES, J. M. Organic Matter and Water-Stable Aggregates in Soils. *European Journal of Soil Science*, 33, 141-163, 1982.

THOMAZ, E.L.; ROSS, J.L.S. Processos hidrogeomorfológicos em vertente com solos argilosos rasos em Guarapuava-PR, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, n.2, 2006.

THOMAZ, E. L. & VESTENA, L.R. Measurement of runoff and soil loss from two differently sized plots in a subtropical environment (Brazil). *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 37, 363-373. 2012.

THORNE, C.R. Field measurements of rates of bank erosion and bank material strength. *Erosion and Sediment Transport Measurement*, Proceedings of the Florence Symposium, International Association of Hydrological Sciences Publication, 133, p. 503-512, 1981.

TORRESANI, L.; WU, J.; MASIN, R.; PENASA, M.; TAROLLI, P. Estimating soil degradation in montane grasslands of North-eastern Italian Alps (Italy). *Heliyon*, 5, 2019, e01825.

TORRI, D.; POESEN, J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Science Reviews*, v.130, p.73–85, 2014.

TUFEKCIOGLU, M.; SCHULTZ, R.C.; ISENHART, T.M.; RUSSELL, J.R.; KOVAR, J.L. Stream bank erosion in grazed pasture stream reaches of Southern Iowa, USA. *Natural Resource Ecology and Management Conference Papers, Posters and Presentations*. Paper 22, 2013. Disponível em: [http://lib.dr.iastate.edu/nrem\\_conf/22](http://lib.dr.iastate.edu/nrem_conf/22).

UAGODA, R.; AVELAR, A. de S.; COELHO NETTO, A.L. Depressões fechadas em relevo cáestico-quartzítico, bacia do ribeirão Santana, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. Vol. 29 – 2, p. 87-100, 2006.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, v.63, p.132–153, 2005.

VALERIANO, M. de M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T.G. (org.). *Geomorfologia: conceitos e temas atuais*. Oficina de Textos, São Paulo, 2008.

VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; OOSTWOUD WIJDENES, D.; GYSSELS, G. Short-term bank gully retreat rates in Mediterranean environments. *Catena*, 44, p. 133-161, 2001.

VANMAERCKE, M.; POESEN, J.; MELE, B.V.; DEMUZERE, M.; BRUYNSEELS, A.; GOLOSOV, V.; BEZERRA, J.F.R.; BOLYSOV, S.; DVINSKI, A.; FRANKL, A.; FUSEINA, Y.; GUERRA, A.J.T.; HAREGEWEYN, N.; IONITA, I.; IMWANGANA, F.M.; MOEYERSONS, J.; MOSHE, I.; SAMANI, A.N.; NIACSU, L.; NYSSSEN, J.; OTSUKI, Y.; RADOANE, M.; RYSIN, I.; RYZHOV, Y.V.; YERMOLAEV, O. How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews*, v.154, p.336–355, 2016.

VENTURI, L.A.B. O papel da técnica no processo de produção científica. In: VENTURI, L.A.B. (Org.). *Praticando a geografia: técnicas de campo e laboratório em geografia e análise ambiental*. 2ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 13-18.

VINCI, A.; BRIGANTE, R.; TODISCO, F.; MANNOCCHI, F.; RADICIONI, F. Measuring rill erosion by laser scanning. *Catena*, v.124, p.97–108, 2015.

VON ELVERFELDT, K. *System Theory in Geomorphology*. Challenges, Epistemological Consequences and Practical Implications. Springer, Dordrecht, 2012.

WANG, B.; ZHENG, F.; RÖMKENS, M.J.M.; DARBOUX, F. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*, v.187, p.1–10, 2013.

WANG, R., ZHANG, S., PU, L., YANG, J., YANG, C., CHEN, J., GUAN, C., WANG, Q., CHEN, D., FU, B., SANG, X. Gully erosion mapping and monitoring at multiple scales based on multi-source remote sensing data of the Sancha river catchment, Northeast China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 5 (200), 2016.

WANG, B.; ZHANG, G.; YANG, Y.; LI, P. ; LIU, J. The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment. *Catena*, 166, 2018, p. 192-199.

WANG, H. ; ZHANG, G. ; LI, N. ; ZHANG, B. ; YANG, H. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 325, 2018, p. 18-27.

WANG, Y.; RAN, L.; FANG, N.; SHI, Z. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau. *Catena*, 167, 2018, p. 257-265.

WANG, H.; ZHANG, G.; LI, N.; ZHANG, B.; YANG, H. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. *Catena*, 174, 2019, p. 24-35.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. DE S.; NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesquisas agropecuárias brasileiras*, v.40, n.5, p.487-494, 2005.

WENDLING, B.; FREITAS, I. C. V.; OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. *Bioscience Journal*, v.28, p.256- 265, 2012.

WIRTZ, S.; SEEGER, M.; RIES, J.B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91, pp. 21-34, 2012.

WISCHMEIER, W.H. ; MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of America Proc.*, vol. 33, 1969. p.131-137.

WHITFORD, J.A.; NEWHAM, L.T.H.; VIGIAK, O.; MELLAND, A.R.; ROBERTS, A.M. Rapid assessment of gully sidewall erosion rates in data-poor catchments: a case study in Australia. *Geomorphology*, 118, p. 330-338, 2010.

WOLMAN, M.G. Factors influencing erosion of a cohesive river bank. *American Journal of Science*, 257, p. 204-216, 1959.

XAVIER, R.A.; COELHO NETTO, A.L. Caracterização geomorfológica da bacia do rio Turvo-RJ: Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (MVPRS). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n° 1, pp. 35-45, 2014.

XIONG, M.; SUN, R.; CHEN, L. A global comparison of soil erosion associated with land use and climate type. *Geoderma*, 343, 2019, p. 31-39.

YIBELTAL, M.; TSUNEKAWA, A.; HAREGEWEYN, N.; ADGO, E.; MESHESHA, D.T.; MASUNAGA, T.; TSUBO, M.; BILLI, P.; EBABU, K.; FENTA, A.A.; BERIHUN, M.L. Morphological characteristics and topographic thresholds of gullies in different agro-ecological environments. *Geomorphology*, 341, 2019, p. 15-27.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*, v. 28, pp. 337-351, 1936.

YÜKSEK, T.; KURDOĞLU, O.; YÜKSEK, F. The effects of land use changes and management types on surface soil properties in Kafkasör Protected Area in Artvin, Turquia. *Land Degradation & Development*, v. 21, 2010, p. 582–590.

ZANGIROLAMI, G.F.; LONGO, R.M.; BETTINE, S.C.; DEMAMBORO, A.C.; RIBEIRO, A.I. Proposta de recuperação ambiental do entorno da mata do quilombo (Campinas/SP). *Anais VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*. Porto Alegre/RS. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 8p., 2015.

ZEGEYE, A.D.; LANGENDOEN, E.J.; STOOFF, C.R.; TILAHUN, S.A.; DAGNEW, D.C.; ZIMALE, F.A.; GUZMAN, C.D.; YITAFERU, B.; STEENHUIS, T.S. Morphological dynamics of gully systems in the subhumid Ethiopian Highlands: the Debre Mawi watershed. *Soil*, v.2, p.443–458, 2016.

ZENG, Q.; DARBOUX, F.; MAN, C.; ZHU, Z.; AN, S. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China). *Catena*, 167, 2018, p. 276-283.

ZHOU, Z.C.; GAN, Z.T.; SHANGGUAN, Z.P.; DONG, Z.B. Effects of grazing on soil physical properties and soil erodibility in semiarid grassland of the Northern Loess Plateau (China). *Catena*, 82, pp. 87-91, 2010.

ZUQUETTE, L.V. & GANDOLFI, N. *Cartografia Geotécnica*. São Paulo: Oficina de textos, 2004.

### Sítios da Internet

[www.microbacias.rj.gov.br/pt/microbacia/rio-das-pedras#sthash.b4P2Z6VM.dpuf](http://www.microbacias.rj.gov.br/pt/microbacia/rio-das-pedras#sthash.b4P2Z6VM.dpuf)

<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais>

[ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas\\_e\\_mapas](ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas)

<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais>

[ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas\\_e\\_mapas/](ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/)

<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/EstudosePublicacoes/EstadodoAmbiente/index.htm&lang>

<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/arquivos-raster>

<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/>

<https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtm#2>

<https://kb.sccsurvey.co.uk/download/138/leica-c5-c10/2194/leica-scanstation-c10-c5-user-manual.pdf>

[https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2\\_054167](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167)

<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/04/mundo-perde-area-do-tamanho-da-belgica-em-florestas-tropicais-primarias-em-2018;>

<https://www.dw.com/pt-br/brasil-foi-pa%C3%ADs-que-mais-perdeu-florestas-tropicais-nativas-em-2018/a-48489812;>

[https://www.youtube.com/watch?v=I\\_C9IIIaMBw](https://www.youtube.com/watch?v=I_C9IIIaMBw)

[https://www.youtube.com/watch?v=nRQmtBC33gc&index=4&list=PLZLj6kQt2eXG3Ch1Ftrpxjt4F7vk\\_BZzh](https://www.youtube.com/watch?v=nRQmtBC33gc&index=4&list=PLZLj6kQt2eXG3Ch1Ftrpxjt4F7vk_BZzh)

<https://www.youtube.com/watch?v=GudbSha0LX4>