

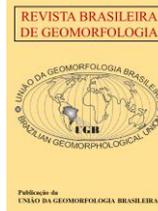


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, n° ESPECIAL (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2326>



Artigo de Pesquisa

Plantios de Eucalipto em Matriz de Pastagem e Reativação Erosiva de Voçorocas na Bacia do Rio Sesmária (SP/RJ): um ciclo de instabilidade em vales de cabeceiras

Eucalyptus Planting in Pasture Matrix and Erosive Reactivation of Gullies in the Sesmária River Basin (SP/RJ): a cycle of instability in headwater valleys

Ana Carolina Facadio ¹, Anderson Mululo Sato ² e Ana Luiza Coelho Netto ³

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Laboratório de Geo-Hidroecologia e Gestão de Riscos (Geoheco/ UFRJ). Rio de Janeiro, Brasil. cfacadio@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0123-0492>

² Universidade Federal Fluminense, Instituto de Educação de Angra dos Reis, Departamento de Geografia e Políticas Públicas. Angra dos Reis, Brasil. andersonsato@id.uff.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1777-4032>

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Laboratório de Geo-Hidroecologia e Gestão de Riscos (Geoheco/ UFRJ). Rio de Janeiro, Brasil. ananetto@acd.ufrj.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0158-0994>

Recebido: 12/12/2022; Aceito: 12/09/2023; Publicado: 28/09/2023

Resumo: No século XXI, os plantios de eucaliptos expandiram-se no médio vale do rio Paraíba do Sul, substituindo pastagens degradadas. Alguns estudos associam esses plantios à redução do nível d'água subterrânea, mas observações de campo indicaram que a atividade erosiva, causada por mecanismos relacionados aos fluxos de água subterrânea é significativa. Este estudo foca na reativação dos processos erosivos que levam ao crescimento regressivo de voçorocas após a introdução de eucaliptos em áreas de pastagens. Foram realizados experimentos de infiltração, monitoramento da sucção no solo, medição dos níveis d'água em poços e avaliação da erosão nas voçorocas após a introdução dos eucaliptos. Os resultados indicaram que a cobertura de eucaliptos facilitou a infiltração da chuva, alimentando aquíferos temporários e suspensos. Esses fluxos, combinados com o aquífero permanente, causaram erosão devido à pressão excessiva nas margens, fundo das voçorocas e encostas. As altas taxas iniciais de erosão, logo após a introdução dos eucaliptos, foram reduzindo ao longo dos anos. A vegetação arbórea começou a se recuperar nas voçorocas, indicando uma tendência à estabilização. Em resposta às mudanças no uso da terra, o sistema de drenagem e erosão passa por um período de ajuste interno em busca de um novo equilíbrio e estabilidade.

Palavras-chave: eucalipto; voçoroca; aquífero regional permanente; aquífero suspenso temporário; faces de exfiltração.

Abstract: In the 21st century, eucalyptus plantations have expanded in the middle valley of the Paraíba do Sul River, in the southwestern region of Brazil, replacing degraded pastures. Some studies associate these plantations with the reduction of groundwater levels, but field observations have indicated that erosive activity related to permanent and temporary underground water flows is more significant. This study focuses on the reactivation of erosive processes leading to the regressive growth of gullies after the introduction of eucalyptus in pasture areas. Infiltration experiments, soil suction monitoring, well water levels, and gully erosion were conducted after the introduction of eucalyptus. The results indicated that eucalyptus

cover facilitated rainwater infiltration, feeding temporary and suspended aquifers. These flows, combined with the permanent aquifer, caused erosion due to excessive pressure on gully margins, bottoms, and slopes. Erosion rates decreased over the years after the introduction of eucalyptus. Tree vegetation began to recover in the gullies, indicating a trend towards stabilization. In response to changes in land use, the drainage and erosion system are undergoing an internal adjustment period in search of a new balance and stability.

Keywords: eucalyptus; gully; permanent aquifer; temporary aquifer; seepage erosion.

1. Introdução

A área estimada de florestas plantadas no Brasil alcançou o total de 94.868,39 km² em 2021, sendo 76,9% relativo à cobertura de eucalipto, concentrada na região Sudeste do país (PEVS/ IBGE, 2022). Na transição para o século XXI, manchas de eucalipto foram introduzidas em uma matriz de pastagem degradada e, em alguns casos, próximos a manchas de floresta secundária no domínio de colinas do médio vale do rio Paraíba do Sul (MVRPS), entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro (VIANNA; COELHO NETTO; SATO, 2009). No mapeamento a partir de imagens de satélite da região do vale do rio Paraíba do Sul, na porção paulista, produzido por Ronquim e Cocharski (2016ab), as manchas de eucalipto cobriam 352 km² em 1985 e alcançaram um total de 1.136 km² em 2015 (8,1% do total de 13.974 km² de área mapeada) avançando principalmente sob antigas áreas de pastagens. Grande parte dos eucaliptos na região é destinada ao setor de celulose e papel, sendo indivíduos clonais, híbridos, resultantes de duas espécies do gênero *Eucalyptus* (*E. urophylla* x *E. grandis*). Os plantios apresentam idade e espaçamento uniformes, usualmente com rotações inferiores a oito anos e ocupam os divisores de drenagem e encostas laterais dos vales de baixo nível hierárquico (ou cabeceiras de drenagem) onde, nos fundos desses vales, prevalece a vegetação secundária (nativa da Mata Atlântica) em diferentes estágios de regeneração, como zonas de amortecimento da rede de canais fluviais (SATO; AVELAR; COELHO NETTO, 2011).

Após um período de aproximadamente cem anos com o uso de pastagem extensiva nas áreas rurais da região, o crescimento da monocultura de eucalipto tem promovido um acelerado processo de transformação no uso e cobertura da terra (SATO, 2008; VIANNA; COELHO NETTO; SATO, 2009; RONQUIM; COCHARSKI, 2016ab). Os possíveis efeitos desta mudança na dinâmica hidro-erosiva dentro das áreas de plantios de eucalipto e proximidades permanecem em aberto. Durante incursões a campo pela região do vale do rio Paraíba do Sul, em 2004, os autores observaram evidências de intensa atividade erosiva por ação da água subsuperficial em faces de exfiltração relacionadas a cortes de estradas à jusante de plantios de eucalipto. Este fato chamou atenção uma vez que, usualmente, se atribui ao eucalipto uma função de extração ou ressecamento da água do solo e diminuição do fluxo d'água nos canais (*streamflow*), assim como o rebaixamento do nível freático em resposta à inibição da recarga dos aquíferos (VAN LILL; KRUGER; VAN WYK, 1980; LIMA et al., 1990; SCOTT; LESCH, 1997; ZHOU et al., 2002; ALBAUGH et al., 2013; OUYANG et al., 2016), o que, a princípio, não induziria esse tipo de erosão.

Nesse contexto, a introdução dos plantios de eucalipto na região foi inicialmente avaliada como uma possível mudança favorável ao rebaixamento do aquífero regional, capaz de desacelerar ou estabilizar a erosão por ação da água subterrânea e o crescimento de voçorocas. Entretanto, após a inserção desses plantios na bacia do rio Sesmaria (149 km²), observou-se a reativação erosiva de canais incisivos, do tipo voçoroca, que estavam anteriormente estabilizados (SATO, 2012; FACADIO, 2016). Essa constatação estimulou o desenvolvimento de pesquisas voltadas a um maior conhecimento e explicação do papel dos plantios de eucalipto na hidrologia e erosão, com atenção na expansão da rede de canais e recuo de encostas.

O foco inicial das pesquisas foi o reconhecimento da interceptação das chuvas nas encostas sob plantios de eucalipto e, de forma inédita na literatura, verificou-se que abaixo do dossel ocorre um aumento dos fluxos d'água junto ao tronco, em decorrência da arquitetura de galhos convergentes e intenso gotejamento, resultando numa concentração da água de chuva que, em média, atinge 160% da quantidade mensurada acima das copas arbóreas, podendo atingir pontualmente até 567% (SATO et al., 2011). Melos, Sato e Coelho Netto (2010), nesta mesma bacia, observaram no período de outubro de 2006 a setembro de 2008, que a produção média de serrapilheira acumulada foi 8,4 Mg.ha⁻¹, sendo de 10,2 Mg.ha⁻¹ no divisor e 6,6 Mg.ha⁻¹ na encosta lateral. Esses mesmos autores indicam que a capacidade de retenção hídrica da serrapilheira de eucalipto atinge um valor médio de 235%, ou seja, próximo aos valores médios encontrados na Floresta da Tijuca (RJ) entre 259% (MONTEZUMA, 2005) e 200% (MIRANDA, 1992). O coeficiente de decomposição é baixo (CD=0,39) devido ao microclima e reduzida fauna decompositora

(SATO, 2008). O predomínio de enraizamento pivotante dessas espécies de eucalipto também foi destacado como um fator relevante na percolação preferencial da água no solo, de modo similar ao que foi indicado por Silveira et al. (2005) em floresta tropical úmida de encosta. Algumas questões se desdobraram a partir desses estudos, levando em consideração a interação que os plantios de eucalipto apresentam com a água: qual a influência destes plantios no comportamento hidrológico e erosivo das encostas?

Pesquisas antecedentes na bacia do rio Bananal (518 km²), próxima à bacia do rio Sesmária e com mecanismo de erosão similar na evolução da rede de canais, apontavam uma atividade erosiva intensa associada ao crescimento regressivo da rede de canais através dos vales de cabeceiras, em um padrão evolutivo espacialmente não-uniforme (COELHO NETTO, 2003). A morfologia de canais incisivos com profundidades e larguras variáveis, podendo ultrapassar 30 metros, resultante de mecanismos de erosão por excesso de poro-pressão na face de exfiltração dos fluxos d'água subterrâneos, configura o que foi denominado "voçoroca" por Pichler (1953). Os eixos dos vales de cabeceira de drenagem, por sua vez, são orientados por fraturamentos subverticais da rocha, que constituem as principais vias da exfiltração de fluxos d'água subterrânea por artesianismo, cujas descargas refletem as variações da carga de pressão em profundidade na zona saturada (COELHO NETTO, 2003). A variabilidade temporal da carga de pressão no aquífero não responde diretamente às entradas de chuvas locais, atrasando entre 2 a 4 meses em relação às chuvas acumuladas regionalmente, como atestam os monitoramentos em diferentes localidades da referida bacia (AVELAR; COELHO NETTO, 1992a; 1992b; FONSECA, 2006; ROCHA LEÃO, 2005; LEAL; COELHO NETTO; AVELAR, 2015).

O presente artigo objetiva conhecer e explicar o papel dos plantios de eucalipto na dinâmica hidrológica e erosiva das encostas, no domínio de colinas do médio-vale do rio Paraíba do Sul. Para tanto, a bacia hidrográfica do rio Sesmária (149 km²) foi selecionada como área-laboratório de pesquisas de campo, com foco nos vales de cabeceiras de drenagem localizados em fazendas que tiveram a inserção de eucalipto no início deste século. O foco de atenção é direcionado ao conhecimento dos efeitos do plantio de eucalipto no comportamento hidrológico da zona não-saturada e saturada e na avaliação da extensão dos efeitos da introdução de eucalipto na bacia. Como complemento, incluiu-se o monitoramento das taxas de erosão relacionadas com o crescimento e recuo de voçorocas em vales de cabeceiras adjacentes aos plantios de eucalipto. Vale ressaltar que os canais erosivos das duas voçorocas estavam estabilizadas e foram reativadas concomitantemente à mudança no uso da terra com a introdução do eucalipto. Regionalmente, esses plantios foram introduzidos seguindo um padrão espacial em manchas isoladas sobre uma matriz de gramíneas (pastagens extensivas) com fragmentos esparsos de floresta secundária degradada (VIANNA; COELHO NETTO; SATO, 2009).

2. Área de Estudo

A bacia do rio Sesmária drena o reverso da escarpa Atlântica da Serra do Mar, na margem direita do médio vale do rio Paraíba do Sul (MVRPS) entre as coordenadas 22° 28' e 22° 43' S 44° 35' e 44° 26' W, apresentando uma área correspondente de 149 km², um desnivelamento topográfico de 1.695 m (2.095 m a 400 m) e elevado gradiente topográfico de 0.05 (adimensional, m/m) (SATO, 2008). A bacia é dividida em dois compartimentos geomorfológicos: o domínio colinoso, com altitudes inferiores a 600 m, e o montanhoso com altitudes superiores e desnivelamentos > 300 m. De acordo com Sato (2008), os índices pluviométricos médios anuais no domínio montanhoso variam em torno de 1.996 mm, enquanto no domínio de colinas varia em torno de 1.509 mm. Os meses de outubro a março apresentam índices pluviométricos médios acima de 100 mm mensais e acumulados respondem por aproximadamente 80% do total anual de ambos os domínios (colinas e montanhas). Os meses mais secos são junho, julho e agosto, com médias mensais inferiores a 50 mm.

Quanto ao uso e cobertura da bacia do Sesmária (Figura 1), vale ressaltar que os plantios de eucalipto espalharam no domínio colinoso, enquanto os fragmentos de floresta Atlântica, que no total correspondem a 31,7% da área da bacia, estão mais concentrados no compartimento montanhoso; no domínio colinoso ocorrem pequenos e numerosos fragmentos. Segundo Sato (2008), a matriz da paisagem desta bacia, assim como o encontrado por todo o MVRPS, é de gramíneas destinadas à pecuária extensiva, totalizando 63,5% da sua área; apenas 1,6% da área da bacia corresponde à ocupação urbana (em expansão) da cidade de Resende (RJ), ao norte, no exutório da bacia em confluência com o rio Paraíba do Sul.

Os rios que drenam o reverso da escarpa da Serra do Mar em direção ao rio Paraíba do Sul, dentre eles o rio Sesmária, têm a formação e crescimento sob forte controle estrutural das rochas subjacentes. Sobre os aspectos geológicos, predominam rochas de idade pré-Cambriana, representadas pelos complexos Embu e Taquaral, além

da suíte Campo Alegre, com orientação NE-SW. Nos metassedimentos do complexo Embu são apontados uma série de dobras antiformais e sinformais. Rochas do terciário são observadas na bacia sedimentar de Resende e os depósitos quaternários são encontrados nos terraços e nas planícies de inundação dos rios tributários Feio, Formoso e São João, além do vale principal nas áreas próximas à sua confluência com o rio Paraíba do Sul. O rio Sesmária drena na direção NE seguindo a orientação (*strike*) das camadas geológicas subjacentes; no seu médio-baixo curso ocorrem mudanças de orientação na interseção com falhas orientadas para NNW (EIRADO SILVA et al, 1993; EIRADO SILVA, 2006).

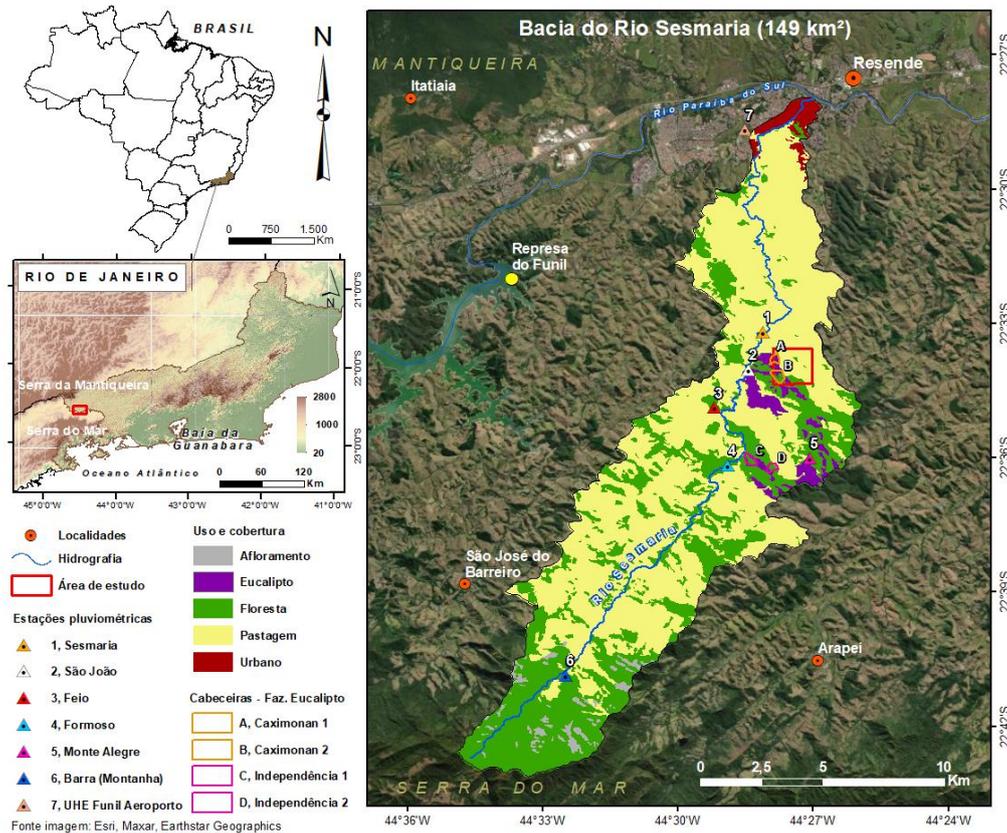


Figura 1. Localização e cobertura do solo da bacia do rio Sesmaria com destaque da área de estudo em vermelho.

Na porção central da bacia do rio Sesmaria, estão situadas as pequenas bacias de drenagem, que correspondem aos vales de cabeceiras selecionados para instalação das estações de monitoramento de campo com plantios de eucalipto. As estações estão localizadas em duas fazendas controladas pela empresa Fibria (atual Suzano Papel e Celulose S.A): Caximonan e Independência (Figura 2). As características de uso e cobertura, assim como os parâmetros geomorfológicos das cabeceiras monitoradas estão listados na Tabela 1. Nesta mesma bacia, a fazenda Monte Alegre (22° 36' 26.94" S; 44° 27' 2.92" O) também foi selecionada para estudos de escoamento superficial. Os plantios foram introduzidos nas fazendas Caximonan e Independência nos meses de março e abril de 2004, respectivamente, com espaçamento de 3 x 2 m ou 3 x 1,5 m, o que acarreta grande homogeneidade ao plantio. A Tabela 2 apresenta os parâmetros dos plantios de eucalipto realizados pela empresa Fibria. Rotineiramente, ao longo do desenvolvimento dos plantios, foram realizadas adubações, capinas químicas e combates às formigas. Esses plantios de eucalipto não foram cortados com sete anos de idade, como previsto anteriormente, por impedimento do órgão ambiental (INEA-RJ).

Na fazenda Itamarati, localizada na vertente oposta da fazenda Caximonan, foram realizadas as atividades de campo para o monitoramento hidrológico e da expansão erosiva de canais por voçorocamento (Figura 3). Nessa fazenda prevalecia uma atividade pecuária extensiva leiteira, nos moldes tradicionais do MVRPS, apresentando uma matriz de gramínea do gênero *Brachiaria*. O histórico de uso da terra nesta fazenda segue o ciclo de substituição direta da floresta Atlântica pelo cultivo de café durante o século XIX e, posteriormente, por gramíneas destinadas à pecuária extensiva ao longo do século XX com pastagens degradadas.

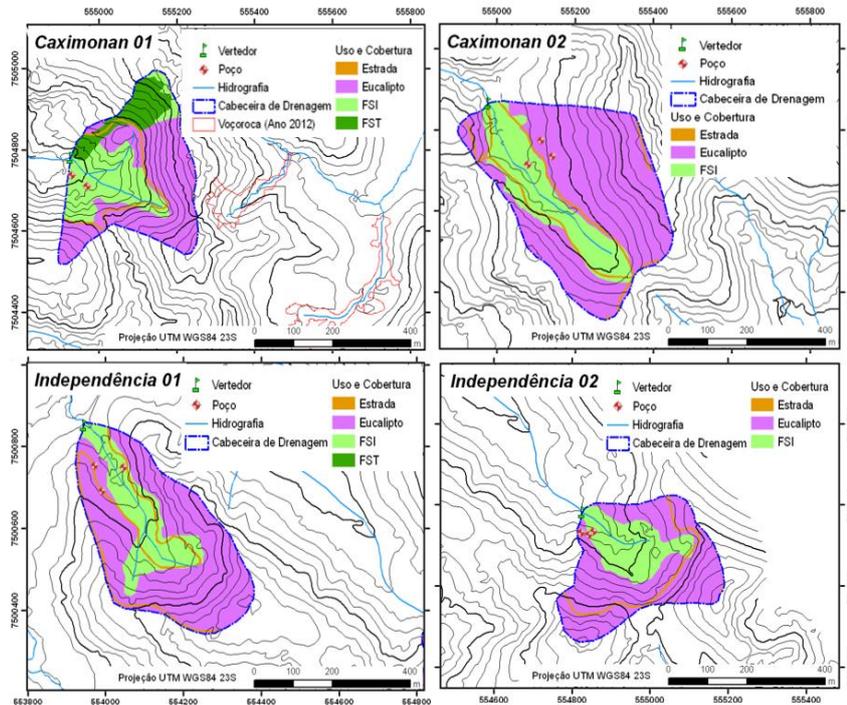


Figura 2. Uso e cobertura das quatro cabeceiras de drenagem monitoradas com plantios de eucalipto nas fazendas Caximonan e Independência e localização dos poços. FSI: floresta secundária inicial, FST: floresta secundária tardia.

Tabela 1. Características de uso e cobertura e parâmetros geomorfológicos das cabeceiras monitoradas.

| Estação | Uso e Cobertura | | | | | | | | Parâmetros Geomorfológicos | | | | | | |
|---------|-----------------|----------|---------|----------|---------|-------|--------|-----------|----------------------------|------|--------|------|-----|------|------|
| | Área (ha) | EUC (ha) | EST (%) | FSI (ha) | FST (%) | P (m) | Cc (m) | Dd (m/ha) | H (m) | G | Ic (%) | | | | |
| Cax 01 | 10,7 | 5,4 | 50,1 | 0,5 | 4,3 | 3,3 | 31,3 | 1,5 | 14,3 | 1500 | 443 | 41,4 | 127 | 0,33 | 59,7 |
| Cax 02 | 18,0 | 12,8 | 70,8 | 0,9 | 4,7 | 4,4 | 24,5 | - | - | 1712 | 513 | 28,5 | 107 | 0,17 | 77,2 |
| Ind 01 | 14,0 | 9,8 | 69,6 | 0,8 | 5,9 | 3,4 | 24,5 | - | - | 1536 | 631 | 45,0 | 127 | 0,20 | 74,7 |
| Ind 02 | 10,1 | 7,0 | 68,5 | 0,4 | 4,1 | 2,8 | 27,4 | - | - | 1316 | 197 | 19,5 | 126 | 0,31 | 73,6 |

EUC: eucalipto; EST: estradas não pavimentadas; FSI: floresta secundária inicial; FST: floresta secundária tardia; P: perímetro; Cc: comprimento de canais; Dd: densidade de drenagem; H: desnivelamento; G: gradiente da bacia; Ic: índice de circularidade.

Tabela 2. Parâmetros da estrutura dos plantios de eucalipto nas cabeceiras de drenagem em janeiro de 2012.

| Estação | Esp. (m) | Data do plantio | Idade (anos) | DAP (cm) | H (m) | H _D (m) | AB (m ² /ha) | IMA (m ³ /ha) | V (m ³ /ha) |
|---------|----------|-----------------|--------------|----------|-------|--------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| Cax 01 | 3 x 2 | 16/02/2004 | 7,95 | 14,1 | 23,1 | 28,2 | 28,9 | 40,4 | 321,2 |
| Cax 02 | 3 x 1,5 | 16/02/2004 | 7,95 | 12,7 | 21,5 | 26,6 | 26,2 | 35,0 | 277,9 |
| Ind 01 | 3 x 2 | 17/03/2004 | 7,85 | 14,8 | 24,0 | 29,4 | 28 | 40,7 | 319,8 |
| Ind 02 | 3 x 2 | 17/03/2004 | 7,85 | 14,8 | 24,0 | 29,4 | 28 | 40,7 | 319,8 |

Esp.: Espaçamento entre os indivíduos; DAP: diâmetro à altura do peito médio; H: altura média; H_D: altura dominante; AB: área basal; IMA: incremento médio anual; V: volume de madeira.

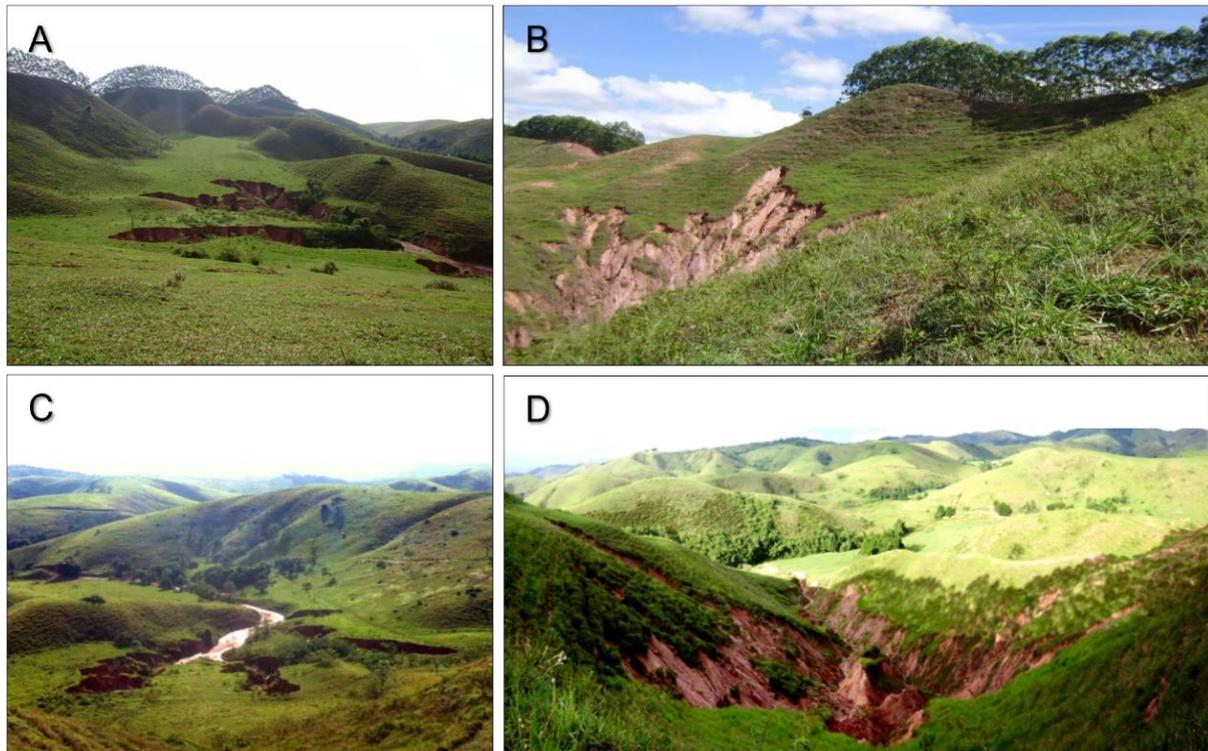


Figura 3. (A) Voçoroca 01 (22° 33' 58.92" S / 44° 27' 35.41" O) em fundo de vale, na fazenda Itamarati, com vista dos plantios de eucalipto no divisor de drenagem na fazenda Caximonan (Cax 01); (B) Voçoroca 02 (22° 33' 50.41" S / 44° 27' 42.86" O) na fazenda Itamarati com vista ao fundo dos plantios de eucalipto na fazenda Caximonan; (C) Voçoroca 01 com avanço dos dígitos no fundo de vale; (D) Vista a partir do divisor da Voçoroca 02 com avanço remontante dos dígitos em direção a porção superior da encosta.

3. Materiais e Métodos

Para avaliar as respostas hidrológicas e erosivas da introdução de manchas de plantios de eucalipto em antigas áreas de pastagem na bacia do rio Sesmária, foram realizadas as seguintes etapas: (1) levantamento de dados de precipitação local; (2) experimentos de infiltração em plantio de eucalipto e pastagem; (3) monitoramento da sucção na zona não-saturada em cabeceiras de drenagem com canais de voçorocamento e em plantios de eucalipto; (4) monitoramento hidrológico da dinâmica do aquífero subterrâneo em cabeceiras de drenagem com presença de plantios de eucalipto; (5) levantamento das voçorocas da bacia do rio Sesmária antes e após a introdução dos plantios de eucalipto; e (6) avaliação da exportação de sedimentos de uma voçoroca durante eventos de chuva. A síntese dos levantamentos de dados está descrita na Tabela 3 e nas seções abaixo.

Tabela 3. Síntese dos levantamentos de dados do estudo.

| Parâmetro | Período | Local |
|--|-----------------|--------------------------------|
| Precipitação | Out/06 a Dez/16 | Bacia do Sesmária |
| Escoamento superficial | Dez/06 a Mai/07 | Faz. Monte Alegre |
| Capacidade de infiltração | Jan/14 a Fev/14 | Faz. Caximonan e Itamarati |
| Sucção | Abr/15 a Nov/15 | Faz. Caximonan e Itamarati |
| Variação do lençol freático | Out/09 a Mar/12 | Faz. Caximonan e independência |
| Contagem e classificação de atividade de voçorocas | 2003 e 2012 | Bacia do Sesmária |
| Classificação de atividade de voçorocas | 2004 a 2012 | Faz. Itamarati |
| Evolução dos dígitos de voçorocas | Abr/12 a Jan/14 | Faz. Itamarati |
| Carga de sedimentos em suspensão | Jan/13 | Faz. Itamarati |

3.1. Monitoramento da precipitação

A precipitação foi mensurada em quatro pontos nas estações dos rios principais (Feio, Formoso, São João, Sesmaria) além de um ponto na fazenda Monte Alegre e outro ponto, mais isolado, na porção montanhosa da bacia (Figura 1), totalizando seis pontos de mensuração (dados primários). A implantação de um ponto de monitoramento de chuvas no domínio montanhoso desta bacia foi realizada em virtude de terem sido apontadas diferenças significativas na pluviosidade média anual entre as estações localizadas no domínio das colinas e no domínio montanhoso (SATO, 2008). Dados secundários da estação e UHE Funil Resende Aeroporto (código ANA 2244161) também foram utilizados para complementar os registros pluviométricos após março de 2012 em razão da descontinuidade no monitoramento da precipitação, totalizando sete pontos de monitoramento.

Nas estações Sesmaria, São João, Feio, Formoso e Monte Alegre as medidas da precipitação foram realizadas com a utilização de três pluviômetros artesanais, como réplicas, sendo a média aritmética destes instrumentos utilizada como valor de referência da precipitação diária. Os pluviômetros artesanais foram feitos com tubos de PVC de 100 mm de diâmetro e colocados sobre suportes de madeira; a precisão e a acurácia destes pluviômetros foram avaliados por Sato, Avelar e Coelho Netto (2011). Na estação Barra, utilizou-se apenas um pluviômetro do tipo *Ville de Paris*. Os detalhes da medição da precipitação em cada estação são descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Características das estações de medição de precipitação.

| # | Estações | Latitude | Longitude | Operador | Domínio | Período | Intervalo |
|---|--------------|------------------|------------------|-------------|----------|-----------------|-----------|
| 1 | Sesmaria | 22° 33' 11,44" S | 44° 28' 07,20" O | Este estudo | Colinas | Nov/08 – Mar/12 | Diário |
| 2 | São João | 22° 34' 01,15" S | 44° 28' 26,37" O | Este estudo | Colinas | Nov/08 – Mar/12 | Diário |
| 3 | Feio | 22° 34' 52,44" S | 44° 29' 11,21" O | Este estudo | Colinas | Nov/08 – Mar/12 | Diário |
| 4 | Formoso | 22° 36' 09,18" S | 44° 28' 53,87" O | Este estudo | Colinas | Nov/08 – Mar/12 | Diário |
| 5 | Monte Alegre | 22° 36' 00,12" S | 44° 27' 04,80" O | Este estudo | Colinas | Out/06 – Mar/12 | Diário |
| 6 | Barra | 22° 40' 50,82" S | 44° 32' 29,49" O | Este estudo | Montanha | Jun/09 – Mar/12 | Diário |
| 7 | UHE Funil | 22° 28' 32,18" S | 44° 28' 24,97" O | FURNAS | Colinas | Mar/12 – Dez/16 | Diário |

3.2. Infiltração em plantio de eucalipto e pastagem

Para determinar a infiltração e o escoamento superficial foram instaladas e monitoradas duas parcelas de escoamento do tipo *Gerlach*, modificadas por Villas Boas et al. (2005), dentro do plantio de eucalipto na fazenda Monte Alegre (22° 36' 26,05" S / 44° 27' 2,80" O), sendo uma próxima ao divisor (declividade de 8°) e outra na encosta lateral (declividade de 24°), conforme a Figura 4. Essas posições de encosta foram selecionadas por ser conhecido que o divisor é uma área de infiltração, usualmente com menor teor de umidade no solo, enquanto a encosta lateral é uma zona de transferência de água para as porções inferiores e geralmente mais úmida. Cabe destacar que a fazenda Monte Alegre está sobre a mesma litologia (metassedimentos do Complexo Embu, conforme Eirado Silva, 2006) e domínio geomorfológico de colinas convexo-côncavas das estações Caximonan e Independência. Essas parcelas abrangem uma área de 90 m² cada (9 x 10 m), com três colunas e cinco linhas de eucalipto, totalizando quinze indivíduos cada uma, e possuem uma calha coletora na porção terminal com cobertura que conduz a água do escoamento superficial até uma caixa d'água coberta de 1.000 L. As leituras de escoamento foram realizadas diariamente por um leitor de campo com a utilização de recipientes de volume conhecido no período de 22 de dezembro de 2006 a 31 de maio de 2007. Os dados de volume escoado foram convertidos em altura dividindo o volume pela área da parcela e a relação entre o escoamento e a precipitação foi calculada para o mesmo período com base na estação pluviométrica Monte Alegre (Tabela 4).

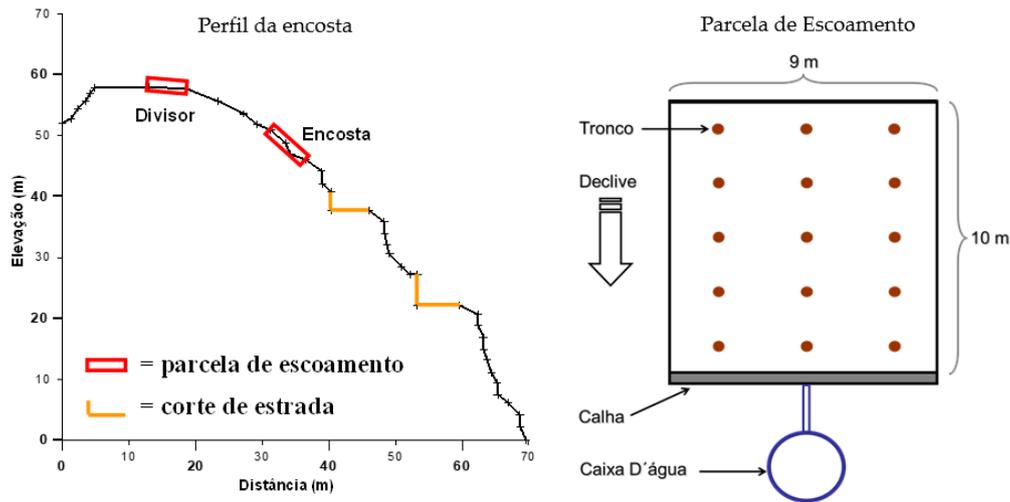


Figura 4. Localização e detalhamento das parcelas de escoamento superficial no divisor e na encosta.

A estimativa da capacidade de infiltração do solo foi obtida através de ensaios com infiltrômetro de duplo anel realizados na cabeceira de drenagem Cax 02 (22° 33' 54.01" S / 44° 27' 47.47" O) sob cobertura de eucalipto, e na fazenda Itamarati (22° 33' 51.83" S / 44° 27' 39.03" O), sob cobertura de pastagem (Figura 5). A capacidade de infiltração instantânea foi calculada de acordo com a Eq. (1). Foram realizados nove ensaios, sendo cinco em pastagem e quatro em plantio de eucalipto no período de 30/01 a 01/02/2014. No cálculo da velocidade de infiltração básica (VIB) utilizou-se a Eq. (2) de Horton (1939), conforme trabalhado por Kazay e Oliveira (2014):

$$I_t^{obs} = \frac{(h_1 - h_2)}{\Delta t} \tag{1}$$

onde:

I_t^{obs} = capacidade de infiltração observada (cm/s)

h_1 = nível d'água superior (cm)

h_2 = nível d'água inferior (cm)

Δt = tempo decorrido para a passagem de h_1 a h_2 (s)

$$f = f_c + (f_o - f_c) \cdot e^{-\beta t} \tag{2}$$

onde:

f = taxa de infiltração (cm/s)

f_c = taxa de infiltração em condição de saturação (cm/s)

f_o = taxa de infiltração inicial (cm/s)

t = tempo (s)

β = parâmetro que deve ser determinado a partir de medições no campo (1/s)

3.3. Monitoramento da sucção na zona não-saturada em cabeceiras de drenagem com voçorocas e plantios de eucalipto

Buscando compreender o comportamento da água no solo, em diferentes profundidades na zona não-saturada, foram instaladas em campo três estações de monitoramento da sucção nos perfis de solos, da seguinte forma: em encosta com cobertura de eucalipto (E); em encosta adjacente ao plantio de eucalipto e com cobertura de gramínea *Brachiaria*/pastagem (G1); em encosta com cobertura de gramínea/pastagem sem interferência dos plantios de eucalipto (G2). As três estações foram dispostas de modo a manter a distância do divisor de drenagem e declividade similares (Figura 5).

O monitoramento foi realizado através de sensores de matriz granular do fabricante *Irrrometer* (modelo *Watermak* 200ss) que funcionam pelo princípio de resistência elétrica variável. O modelo de *data logger* 900M *Irrrometer* foi utilizado para o armazenamento dos dados a cada 15 minutos, onde foram acoplados oito sensores em profundidade, sendo sete sensores de sucção e um para a temperatura do solo. As profundidades dos sensores de sucção instalados no solo foram: 20 cm, 50 cm, 80 cm, 120 cm, 150 cm, 200 cm e 300 cm. Os dados das três

estações de monitoramento foram obtidos durante o período de abril de 2015 a novembro de 2015. Os dados pluviométricos utilizados nas análises foram da estação UHE Funil Resende Aeroporto.

Observações em campo orientaram a escolha das profundidades monitoradas, assim como estudos previamente desenvolvidos que buscaram comparar diferentes coberturas, principalmente entre áreas florestadas e de pastagem como Jansen (2001), Silveira (2004), Dias e Coelho Netto (2011) e Marques et al (2018). Além disso, foi observado que a malha de raízes das gramíneas (*Brachiaria*) estavam concentradas até a profundidade de 40 cm, corroborando com o levantamento feito por Cambra e Coelho Netto (2000) na bacia vizinha (rio Bananal). A seleção das menores profundidades (20, 50 e 80 cm) para instalação dos sensores de sucção buscou avaliar a entrada da água no solo. A escolha das maiores profundidades (120, 150, 200 e 300 cm) estavam vinculadas ao sistema radicular pivotante do eucalipto, com intuito de analisar a percolação da água em maiores profundidades.

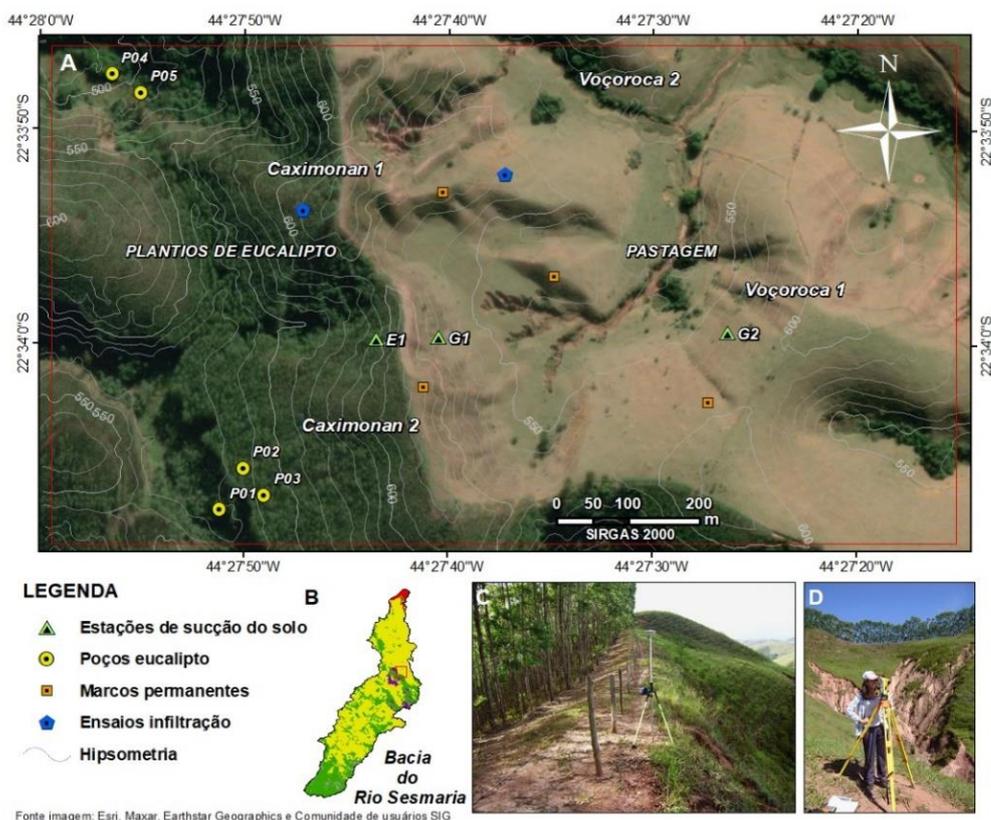


Figura 5. (A) Visão geral da área de monitoramento do estudo com plantio de eucalipto (fazenda Caximonan) e pastagem (fazenda Itamarati) com a localização da rede de marcos para acompanhamento da evolução das voçorocas, poços e os piezômetros e estações com monitoramento de sucção do solo. (B) Bacia do rio Sesmaria e, em vermelho, destaque para a localização da área de monitoramento. (C) Receptor GNSS Trimble para elaboração da rede de marcos; (D) Levantamento do perímetro da voçoroca com a utilização de estação total a partir da rede de marcos.

3.4. Monitoramento do nível d'água subterrâneo (NA) em cabeceiras de drenagem com plantios de eucalipto e interior das voçorocas

As quatro cabeceiras de drenagem destacadas na Figura 2 (Cax 01, Cax 02, Ind 01 e Ind 02) foram monitoradas entre os anos de 2009 e 2012 através da instalação de poços para o acompanhamento da água subterrânea associados ao monitoramento pluviométrico. As cabeceiras de drenagem estão a uma distância máxima de 4 km entre si e apresentam substrato geológico, dimensões e orientação do eixo semelhantes (Figura 2).

A variação do NA foi monitorada em onze poços instalados nas quatro estações de cabeceira de drenagem: Caximonan 01 (P4 e P5), Caximonan 02 (P1, P2 e P3), Independência 01 (P7, P8 e P9) e Independência 02 (P10, P11), conforme Figura 2 e Tabela 5. Todos os poços apresentaram água em algum momento no período de monitoramento, com exceção do P12 e por esta razão foi excluído das análises.

Tabela 5. Localização e características dos poços de monitoramento da água subterrânea.

| Poços | Estação | Latitude | Longitude | H (m) | Prof. (m) | Posição | Cobertura |
|-------|---------|-------------------|-------------------|--------|-----------|---------|-----------|
| P01 | Cax 02 | 22° 34' 7,657" S | 44° 27' 51,199" O | 527,75 | 8,8 | FV | Capoeira |
| P02 | Cax 02 | 22° 34' 5,740" S | 44° 27' 50,045" O | 538,87 | 19,0 | BME | Eucalipto |
| P03 | Cax 02 | 22° 34' 6,989" S | 44° 27' 49,028" O | 544,20 | 17,5 | BME | Eucalipto |
| P04 | Cax 01 | 22° 33' 47,434" S | 44° 27' 56,519" O | 494,82 | 5,8 | FV | Gramínea |
| P05 | Cax 01 | 22° 33' 48,311" S | 44° 27' 55,129" O | 510,03 | 12,0 | BME | Gramínea |
| P07 | Ind 01 | 22° 35' 57,201" S | 44° 28' 26,982" O | 480,49 | 4,5 | FV | Capoeira |
| P08 | Ind 01 | 22° 35' 57,119" S | 44° 28' 29,591" O | 485,46 | 14,5 | BME | Eucalipto |
| P09 | Ind 01 | 22° 35' 59,117" S | 44° 28' 28,926" O | 487,10 | 14,8 | BME | Eucalipto |
| P10 | Ind 02 | 22° 36' 10,606" S | 44° 27' 58,583" O | 525,78 | 6,5 | FV | Gramínea |
| P11 | Ind 02 | 22° 36' 10,906" S | 44° 27' 59,023" O | 536,08 | 16,2 | BME | Eucalipto |
| P12 | Ind 02 | 22° 36' 10,720" S | 44° 27' 59,701" O | 542,46 | 18,2 | BME | Eucalipto |

FV: fundo de vale, BME: baixa-média encosta, H: elevação do poço.

A leitura da profundidade do NA foi realizada semanalmente com a utilização de sensor manual. Os dados do NA foram trabalhados como profundidade em relação à superfície, como elevação a partir dos dados de elevação geoidal e foram normalizados visando uma comparação das respostas de recarga e depleção entre os diferentes poços, conforme a Eq. (3). Em cada cabeceira de drenagem com plantio de eucalipto foi instalado um poço dentro de Área de Preservação Permanente (APP), próximo ao canal de drenagem, enquanto os demais poços foram instalados dentro de plantios de eucalipto, visando monitorar a oscilação do lençol freático em fundos de vale e baixa-média encosta. Os dados pluviométricos utilizados nas análises foram a média das estações inseridas na bacia do rio Sesmaria.

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

onde:

$\widetilde{NA}_{i,j}$ = profundidade do NA normalizado do poço i no dia j

$NA_{i,j}$ = profundidade do NA do poço i no dia j

\overline{NA}_i = profundidade média do NA do conjunto de dados do poço i

DP_i = desvio padrão da profundidade do NA do conjunto de dados do poço i

3.5. Levantamento das voçorocas da bacia do rio Sesmaria antes e após a introdução dos plantios de eucalipto

Para o levantamento do número total de voçorocas presentes na bacia do rio Sesmaria antes e após a introdução de eucalipto, foram selecionadas duas imagens orbitais em dois períodos: no ano de 2003 (*Ikonos – Google Earth/Maxar Technologies*) e o ano de 2012 (*QuickBird / Projeto Sesmaria*). As voçorocas foram classificadas em ativas e inativas nos dois períodos analisados através de interpretação das imagens de satélite, no intuito de investigar possíveis mudanças de atividade das voçorocas presentes na bacia. É importante destacar que a introdução dos plantios ao longo da bacia ocorreu no ano de 2004, portanto as imagens se referem ao momento anterior e após a introdução da monocultura de eucalipto na área.

A evolução das duas voçorocas na fazenda Itamarati, localizadas na vertente oposta aos plantios de eucalipto na fazenda Caximonan, foi analisada durante os anos de 2004 a 2023. Para a análise temporal da evolução das duas voçorocas foram analisadas fotografias aéreas e imagens orbitais a fim de obter um histórico com diferentes fases de desenvolvimento, tendo assim um panorama dos momentos de atividade e estabilidade destes processos. As fotografias aéreas 2743-1 NO e 2743-1 SO do IBGE, relativas aos anos de 2004, serviram para avaliar o estágio das duas voçorocas no ano de introdução dos plantios de eucalipto na área. As imagens orbitais de alta resolução espacial de propriedade da *Maxar Technologies* através do *Google Earth Pro* datadas em 07/02/2003, 21/08/2010, 03/05/2016 e 09/06/2023 foram utilizadas para a análise da evolução das voçorocas.

Na estimativa das taxas de recuo das cabeças dos dígitos das voçorocas, foram realizados levantamentos em campo, utilizando como base uma rede de marcos permanentes e temporários com auxílio de D-GPS *Trimble* modelo R6 e estação total *Trimble* modelo S3. Toda a base digital foi estruturada em campo pela transposição do marco geodésico SAT 93652 da cidade de Bananal/SP para pontos de controle no entorno das voçorocas, totalizando quatro marcos permanentes em concreto e dezenove marcos temporários, georreferenciados com receptores GNSS através da técnica de posicionamento relativo estático. A estação total foi posicionada na rede de marcos permanentes e temporários e, para uma maior precisão do contorno das voçorocas, os prismas foram posicionados a cada 2 m, fechando um polígono para cada voçoroca. O perímetro da voçoroca 01 foi delineado em diferentes momentos: abril de 2012; janeiro de 2013, agosto de 2013 e janeiro de 2014. A partir da sobreposição destes contornos no *software* ArcGIS 10, foi calculada a diferença das áreas dos dígitos e a taxa de recuo da cabeça do canal-dígito.

Tendo por base a comparação das fotografias aéreas com as imagens orbitais, assim como o levantamento e as observações feitas em campo, foi possível obter um histórico da evolução das voçorocas, em fase pré-plantio (antes de 2004) e após sua introdução, no que diz respeito aos períodos de atividade/ estabilidade e desenvolvimento.

4. Resultados

4.1. Comportamento da água no solo

4.1.1 Produção de escoamento superficial nas encostas com plantio de eucalipto e gramínea

O escoamento superficial foi monitorado em 52 dias chuvosos, no período entre dezembro de 2006 a maio de 2007, indicando um valor médio da razão Q/P (vazão do escoamento superficial/precipitação terminal) variando entre 0,1% no divisor e 0,2 % na encosta lateral, onde os valores máximos alcançaram apenas 1,3% e 3,8%, respectivamente, em resposta à precipitação de 90 mm. A declividade na encosta lateral (24°) é três vezes maior que a do divisor (8°) o que parece influenciar nessas diferenças da razão Q/P. Vale destacar que os plantios seguem um padrão espacial uniforme e apresentam espessa camada de serrapilheira não estruturada (até 50 cm de espessura) com capacidade de retenção de umidade similar ao observado em florestas tropicais úmidas, em torno de 250% (COELHO NETTO, 1985; MIRANDA, 1992). Essa baixa proporção de escoamento superficial sugere, por outro lado, que esses plantios favorecem a entrada da precipitação terminal, mais concentrada junto aos troncos (SATO et al, 2011), assim como suas raízes pivotantes (~ 2 metros de profundidade) contribuem para a percolação preferencial em profundidade, como foi constatado por Silveira et al. (2005) através de experimentos de campo nas encostas do Parque Nacional da Tijuca, no Rio de Janeiro. Deste modo, essas encostas sob esses plantios de eucalipto configuram um ambiente favorável à infiltração das águas de chuvas.

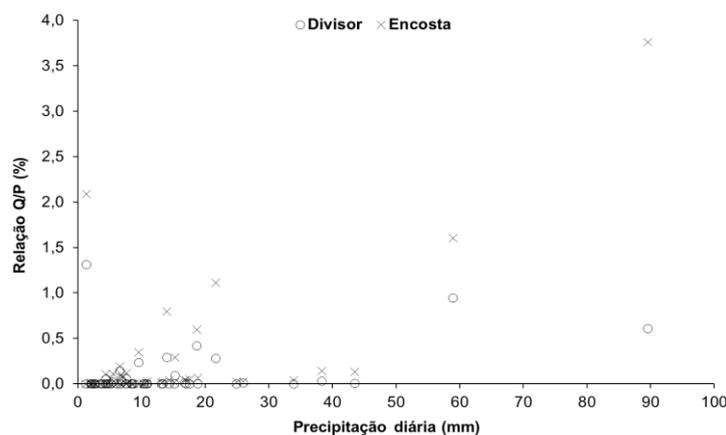


Figura 6. Variação da relação Q/P (escoamento superficial / precipitação) em função da precipitação na estação Monte Alegre nas parcelas do divisor e encosta.

Para fins de comparação com o ambiente pretérito de gramíneas com pastagem extensiva, a Tabela 6 mostra os resultados das medidas de velocidade de infiltração básica (VIB) dos ensaios com infiltrômetros de duplo anel. Os ensaios realizados em pastagem (fazenda Itamarati) e no plantio de eucalipto (fazenda Caximonan) tiveram

duração variando de 69 a 262 minutos, em função das características específicas dos pontos de ensaios. Observa-se que a VIB média varia entre o solo com plantio de eucalipto ($1,01 \times 10^{-2}$ cm/s) e a pastagem ($6,67 \times 10^{-3}$ mm/s), corroborando com os resultados das parcelas de escoamento que apresentam os plantios de eucalipto como um ambiente de maior capacidade de infiltração, do que no ambiente de pastagem.

Tabela 6. Velocidade de infiltração básica (VIB) nos ensaios de capacidade de infiltração em pastagem e eucalipto.

| Tratamento | Pastagem | | Eucalipto | | |
|---------------|----------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| | Ensaio # | Duração (min) | VIB (cm/s) | Duração (min) | VIB (cm/s) |
| | 1 | 262 | $2,25 \times 10^{-3}$ | 69 | $2,08 \times 10^{-2}$ |
| | 2 | 102 | $6,73 \times 10^{-3}$ | 174 | $5,53 \times 10^{-3}$ |
| | 3 | 130 | $7,27 \times 10^{-3}$ | 163 | $4,00 \times 10^{-3}$ |
| | 4 | 145 | $7,31 \times 10^{-3}$ | --- | --- |
| | 5 | 74 | $9,80 \times 10^{-3}$ | --- | --- |
| Média | | 143 | $6,67 \times 10^{-3}$ | 135 | $1,01 \times 10^{-2}$ |
| Desvio | | 72 | $2,74 \times 10^{-3}$ | 58 | $9,31 \times 10^{-3}$ |

4.1.2. Variação da sucção em plantios de eucalipto e gramínea/pastagem extensiva

A Figura 7 apresenta os valores médios de sucção nas três estações de monitoramento em profundidade (20 cm, 50 cm, 80 cm, 120 cm, 150 cm, 200 cm e 300 cm). A série temporal de abril a novembro de 2015 apresentou duas janelas sem dados (de meados de maio ao início de junho e do final de julho a setembro) por falhas nos equipamentos. Na estação do eucalipto (E) os valores médios de sucção foram mais elevados em todas as profundidades, se comparados às demais estações, ressaltando uma redução expressiva dos valores de sucção em 150 cm de profundidade, ou seja, na altura do limite inferior das raízes pivotantes do eucalipto, sugerindo extração de água do solo pelo eucalipto. Nas encostas sob gramíneas, por outro lado, percebe-se um comportamento diferenciado entre os sítios G1 (adjacente ao plantio de eucalipto) e G2 (sem influência desses plantios). No primeiro, o valor médio de sucção no topo do solo (20 cm/prof.) mostra-se inferior (~ -80 kPa) e com amplo desvio padrão (entre -15 e -145 kPa) numa aproximação aos valores médios observados no solo com eucalipto (~ -125 kPa), mas superiores ao sítio G2, onde os valores médio e desvios são inferiores a -75 kPa e mais uniformes em profundidade, indicando maior estocagem de umidade.

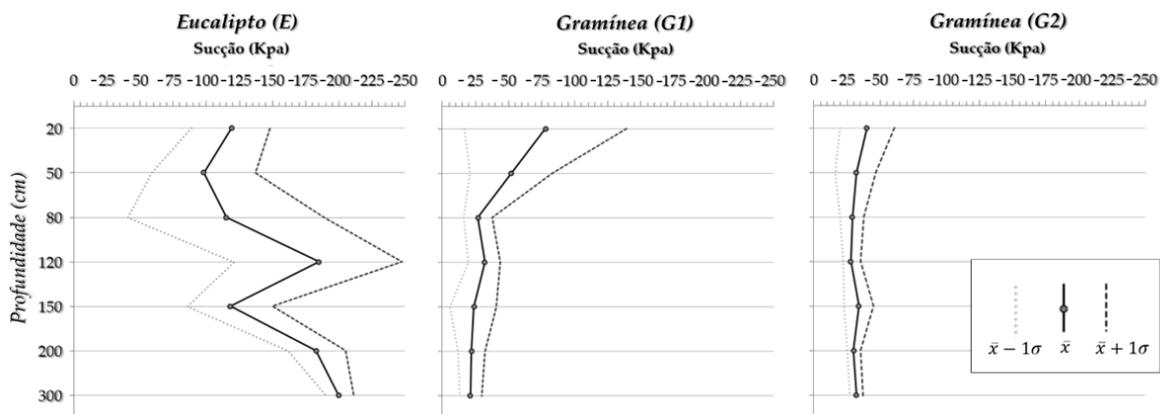


Figura 7. Sucção média com desvio padrão por profundidade na estação eucalipto (E), gramínea 1 (G1) e gramínea 2 (G2).

As variações diárias da sucção podem ser vistas na Figura 8, em um período de início da estação chuvosa (entre 02 de outubro e 15 de novembro de 2015) que sucedeu uma longa estiagem, nas três estações monitoradas. Embora esse tempo amostral seja curto, os dados refletem um comportamento representativo de períodos mais secos.

No perfil do solo com eucalipto verificou-se um atraso nas respostas em relação as entradas de chuvas em todas as profundidades, exceto em 150 cm onde os valores de sucção, que vinham sendo mantidos em torno de -

150 kPa durante a estiagem antecedente e próximo aos valores da porção superior do solo (em 20 e 50 cm/prof.), mostraram uma queda abrupta logo no início das chuvas. Esse comportamento revela uma rápida entrada da água no solo, possivelmente junto às raízes pivotantes do eucalipto. Logo após esse rápido molhamento em 150 cm de profundidade observou-se, na semana seguinte, um aumento gradual da sucção, indicando perda d'água. Possivelmente isto está associado à capilaridade na matriz do solo circundante, seguindo-se um período de estabilidade, apesar das sucessivas chuvas diárias. Após um total acumulado de chuvas, em torno de 140 mm, a sucção em 150 cm de profundidade alternou com valores aproximados entre -70 e -20 kPa. Nas profundidades mais rasas, no topo do solo (20 cm), a sucção pouco variou durante todo o período; a frente de umidade na matriz do solo atingiu apenas as profundidades entre 50, 80 e 120 cm por volta de 3 a 4 dias após o término das chuvas, mas não atingiu as profundidades maiores de 200 e 300 cm.

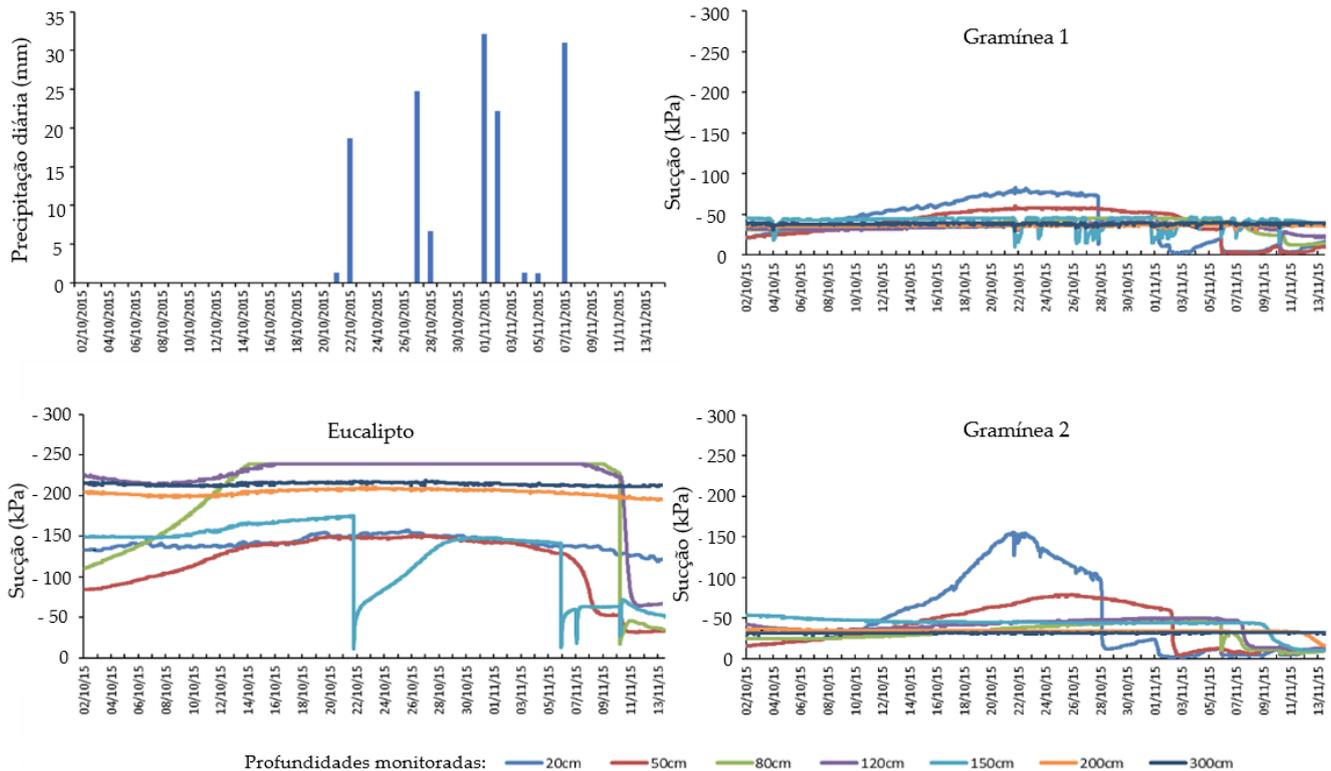


Figura 8. Precipitação na estação Resende e sucção (kPa) por profundidade na estação eucalipto (E), gramínea 1 (G1) e gramínea 2 (G2) no período de outubro a novembro de 2015.

Nas estações de gramíneas/pastagem (G1 e G2) todos os valores de sucção estavam baixos no período antecedente às chuvas, aumentando progressivamente nas profundidades de 20 e 50 cm até o início das chuvas e atingindo a -80 kPa no topo do solo em G1, chegando a pouco mais de -150 kPa nessa mesma profundidade do sítio G2. Na profundidade de 50 cm também ocorrem pequenas diferenças no comportamento da sucção, ressaltando novamente uma amplitude de variação relativamente maior em G2 do que em G1. Este fato sugere que a encosta G2 tende a ser menos úmida do que em G1, pelo menos no meio metro superior do solo. (Figura 8). Fortalecendo essa observação, nota-se, na mesma figura, que no final do período chuvoso o meio metro superior atinge a saturação antes do término do período chuvoso e, logo após, as profundidades de 80 e 120 cm também atingem a saturação. Em G2 nota-se um comportamento similar no meio metro superior do solo, porém com maior amplitude de variação; nesse sítio a frente de umidade avançou até a profundidade de 200 cm com um atraso maior do que as profundidades mais rasas, como esperado.

4.1.3. Relação chuva-nível d’água subterrânea (NA) em vales de cabeceiras de drenagem com plantios de eucalipto

Os níveis d’água (NA) variam entre os vales de cabeceiras monitorados, especialmente entre as posições do fundo de vale (FV) e a baixa-média encosta (BME) – ver Figura 9 e Tabela 7. Os poços nos fundos de vales (P1, P4, P7 e P10) apresentam níveis d’água mais próximos à superfície, como esperado pela convergência de fluxos das partes mais elevadas do entorno. Os NA mais próximos da superfície do terreno ocorrem no fundo de vale em P4 (-1,90 m) e em P7 (-3,36 m) com valores máximos de -0,10 m e -2,34 m respectivamente, assim como apresentam os maiores coeficientes de variação (CV= 38,7% e CV= 19,1%, respectivamente). O NA em P4 é o mais próximo da superfície do terreno e apresenta as maiores oscilações, refletindo o balanço de entradas e perdas d’água na área de contribuição direta com plantio de eucaliptos e também da matriz de gramínea no entorno desse pequeno vale. O comportamento do NA relativamente mais estável em P1 pode estar refletindo o atraso na recarga em profundidades maiores, como expressa o comportamento da sucção apontado anteriormente. Outro aspecto a ressaltar na mesma Figura 9 e Tabela 7, refere-se aos valores mais profundos de NA nos poços P2 e P3 com valores médios de -16,29 m (CV=2,6%) e -16,35 m (CV=3,7%), respectivamente, ambos localizados na baixa-média encosta de geometria retilínea. Os demais poços apresentam NA médio intermediário entre -8,64 m (P5), -11,39 m (P8) e -13,07 m (P9), ressaltando que P5 está localizado na baixa-média encosta, porém mais próximos ao fundo de vale, enquanto P8 e P9 estão mais distantes na média encosta.

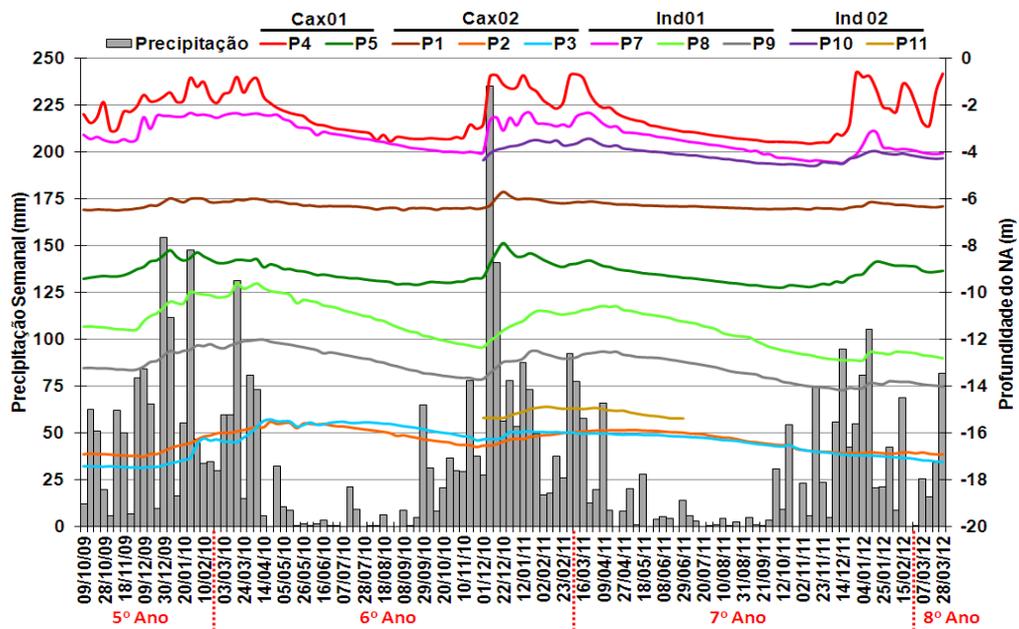


Figura 9. Oscilação da profundidade do NA em todas as estações em cabeceiras de drenagem com plantios de eucalipto. No eixo x (temporal), também está indicada a idade dos plantios de eucalipto, em vermelho.

Tabela 7. Elevação dos poços e profundidade do NA por estação.

| Parâmetros | Cax 01 | | Cax 02 | | | Ind 01 | | | Ind 02 | |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | P4 | P5 | P1 | P2 | P3 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 |
| Elevação (m) | 494,82 | 510,03 | 527,74 | 538,87 | 544,20 | 480,49 | 485,46 | 487,10 | 525,78 | 536,08 |
| Posição | FV | BME | FV | BME | BME | FV | BME | BME | FV | BME |
| NA MÉD (m) | -1,90 | -8,64 | -6,27 | -16,29 | -16,35 | -3,36 | -11,39 | -13,07 | -4,08 | -15,13 |
| NA MAX (m) | -0,10 | -7,39 | -5,71 | -15,52 | -15,42 | -2,34 | -9,62 | -11,99 | -3,44 | -14,89 |
| NA MIN (m) | -3,13 | -9,31 | -6,48 | -17,01 | -17,48 | -4,48 | -12,90 | -14,16 | -4,58 | -15,39 |
| Δ NA (m) | -3,03 | -1,92 | -0,77 | -1,49 | -2,06 | -2,14 | -3,28 | -2,17 | -1,14 | -0,50 |
| DP (m) | 0,9 | 0,4 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,3 | 0,2 |
| CV (%) | 38,7 | 4,8 | 2,4 | 2,6 | 3,7 | 19,1 | 7,9 | 4,6 | 7,9 | 1,2 |

FV: fundo de vale; BME: baixa-média encosta

Em todos os anos houve uma reversão da tendência de queda do NA a partir do mês de dezembro, sendo que a duração desta subida do NA variou entre os anos. Essa reversão é simultânea em todos os poços, independente da profundidade e elevação, o que sugere uma dinâmica da água subterrânea controlada regionalmente. A subida do NA é posteriormente revertida, passando a vigorar um novo período de queda lenta e gradual (Figura 10). O comportamento do rebaixamento do NA contrasta com o de subida, sendo este último mais acentuado e curto.

Um comportamento diferenciado na subida geral do NA ocorreu no período 2011-2012, no qual as oscilações positivas foram marcadamente menores do que nos anos 2009-2010 e 2010-2011. Esta diferença se deve aos menores índices de chuva acumulados no período de setembro a março (período chuvoso) de 2011-2012 em relação ao mesmo período de 2009-2010 e 2010-2011. No período setembro 2011 a março 2012 também ocorreram menos dias chuvosos. É relevante observar que nesse mesmo período a recarga foi menos acentuada em todos os poços, enquanto nos poços P2 e P3 a tendência de queda nem sequer foi rompida, apesar de apresentarem uma redução na queda.

A recarga do aquífero, ou zona saturada, mostrou-se fortemente relacionada com o acumulado de chuvas em 120 dias (Figura 11), especialmente para os períodos mais chuvosos de 2009-2010 ($R^2 = 0,93$) e 2010-2011 ($R^2 = 0,92$). A análise da série de dados de dezembro 2011 a março 2012 indica um $R^2 = 0,20$, pois a menor precipitação acumulada em 120 dias em relação aos anos anteriores e inferior a 800 mm não sustentou a subida do NA, que passou a decair precocemente a partir de janeiro de 2012 e de maneira mais abrupta que nos anos anteriores.

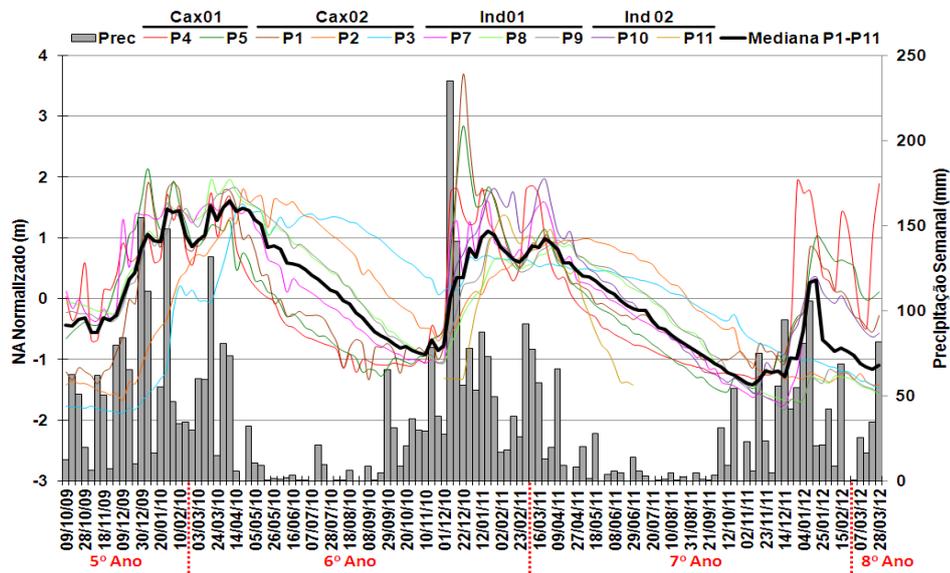


Figura 10. Oscilação da profundidade do NA normalizado em todas as estações com a indicação da mediana. No eixo x (temporal) também está indicada a idade dos plantios de eucalipto.

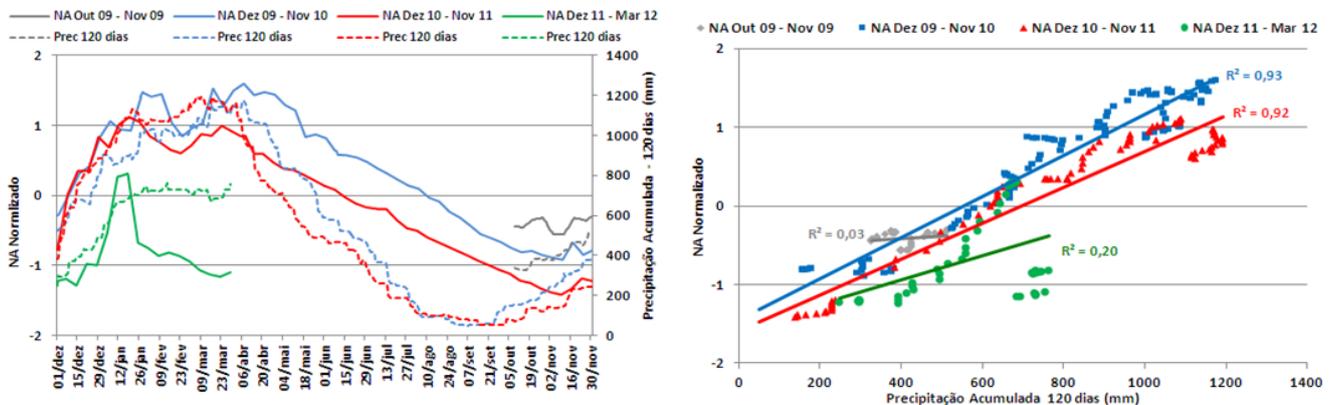


Figura 11. (A) Variação da mediana do NA normalizado (P1 a P11) e precipitação acumulada de 120 dias. (B) Correlação entre o NA e a precipitação acumulada de 120 dias em diferentes períodos.

Assim como a precipitação acumulada no período chuvoso é relevante para o entendimento das oscilações do NA, as chuvas de maior volume também apresentam papel fundamental na recarga do aquífero. Esta recarga é detectada com bastante rapidez nos fundos de vale onde a profundidade do NA é menor. Como exemplo, no P4 foi detectada uma subida do NA superior a 2 m e no P7 superior a 1 m na semana do dia 08/12/2010 em que o acumulado foi de 235 mm (Tabela 8). Nesta semana ocorreu a maior subida durante o monitoramento e que outras semanas com elevados valores de precipitação também proporcionaram expressivas variações positivas do NA. Mais uma vez, as oscilações do NA nos poços nas estações Cax 02 e Ind 02 foram menores que nas estações Cax 01 e Ind 01. Significa, portanto, que as profundidades do NA variam espacialmente entre os vales de cabeceiras, mas também no decorrer do tempo, ou seja, do regime de distribuição das chuvas em âmbito regional e local.

Tabela 8. Variação semanal do NA dos poços (m) para precipitações semanais maiores que 100 mm.

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

S.D.: sem dados. Obs.: o P11 apresentou-se sem dados por ter uma menor série histórica que não coincidiu com os eventos de precipitação superiores a 100 mm.

4.2. Comportamento erosivo e evolução das voçorocas

4.2.1 Reativação erosiva nas voçorocas após o plantio de eucalipto

A identificação e classificação da atividade erosiva das voçorocas, realizada com base em imagem de satélite do ano 2003 (antes dos plantios de eucalipto), mostrou a ocorrência de 29 voçorocas nos vales de cabeceiras, conectadas à rede regional de canais, dentre as quais 17 (58,62%) estavam estabilizadas; 9 (31%) mostravam-se parcialmente estáveis, com atividade erosiva e apenas 3 (10,34%) mantinham-se ativas na bacia do rio Sesmaria. Um segundo levantamento realizado por imagens de alta resolução referentes aos anos 2010 e 2011, respectivamente após 5 e 6 anos dos plantios de eucalipto na bacia, indicou que, dentre essas mesmas 29 voçorocas mapeadas em 2003, apenas 13 (44,83%) permaneciam estáveis; dentre as 9 voçorocas que estavam parcialmente ativas em 2003, 2 (6,8%) voçorocas foram plenamente ativadas, sendo uma delas adjacente ao plantio de eucalipto. Nesse período após os plantios as voçorocas ativas passaram de 3 para 9 (31%) casos de reativação.

Dois casos característicos de reativação de voçorocas (anteriormente estabilizadas) e intensificação da erosão em voçorocas que estavam parcialmente ativas, correspondem às voçorocas 01 e 02, ambas situadas na fazenda Itamarati e adjacentes aos plantios de eucalipto da fazenda Caximonan. O trabalho erosivo foi monitorado por comparação de imagens orbitais e ortofotos aéreas, junto com mensurações de campo de seus respectivos perímetros entre os anos de 2012 e 2014, para avaliação das taxas de crescimento. Vale ressaltar que essas voçorocas cresceram regressivamente através dos fundos de vales, em conexão com a expansão da rede regional de canais, estabilizando no ambiente dominado por gramíneas com pastagem extensiva até o ano 2004 (**Figura 12**); a presença de vegetação arbórea no interior do canal inciso dessas voçorocas testemunha a condição de estabilidade da atividade erosiva, cuja reativação ocorreu logo após os plantios de eucalipto em meados de 2004 nos vales de cabeceiras adjacentes. Ressalta-se, porém, que alguma atividade erosiva ainda ocorria na voçoroca 02, que já atingia a porção mais íngreme da baixa encosta antes do plantio de eucalipto na fazenda Caximonan. Nessa mesma figura 12, observa-se ainda que a incisão na cabeça do canal erosivo da voçoroca 1 estava estabilizada ao longo do canal erosivo e nos pequenos canais-dígitos que já espriavam no fundo do vale, acompanhando o seu alargamento em forma de anfiteatro. Nessa posição, a incisão do canal evoluiu em espesso pacote de sedimentos (colúvios e aluvio-colúvio) possivelmente de idade holocênica, como outros depósitos similares datados na bacia vizinha do rio Bananal (COELHO NETTO, 1999). Vale destacar que as bifurcações da rede de canais, assim como as mudanças na orientação dos canais das duas voçorocas, resultam da interseção de fraturas subverticais por onde afloram os

fluxos artesianos subterrâneos que conduzem a incisão do canal erosivo, assim como a evolução da rede de canais, como estudado em detalhe na bacia do rio Bananal. (COELHO NETTO; AVELAR, 1992; LEAL, COELHO NETTO; AVELAR, 2015; FONSECA et al., 2006).

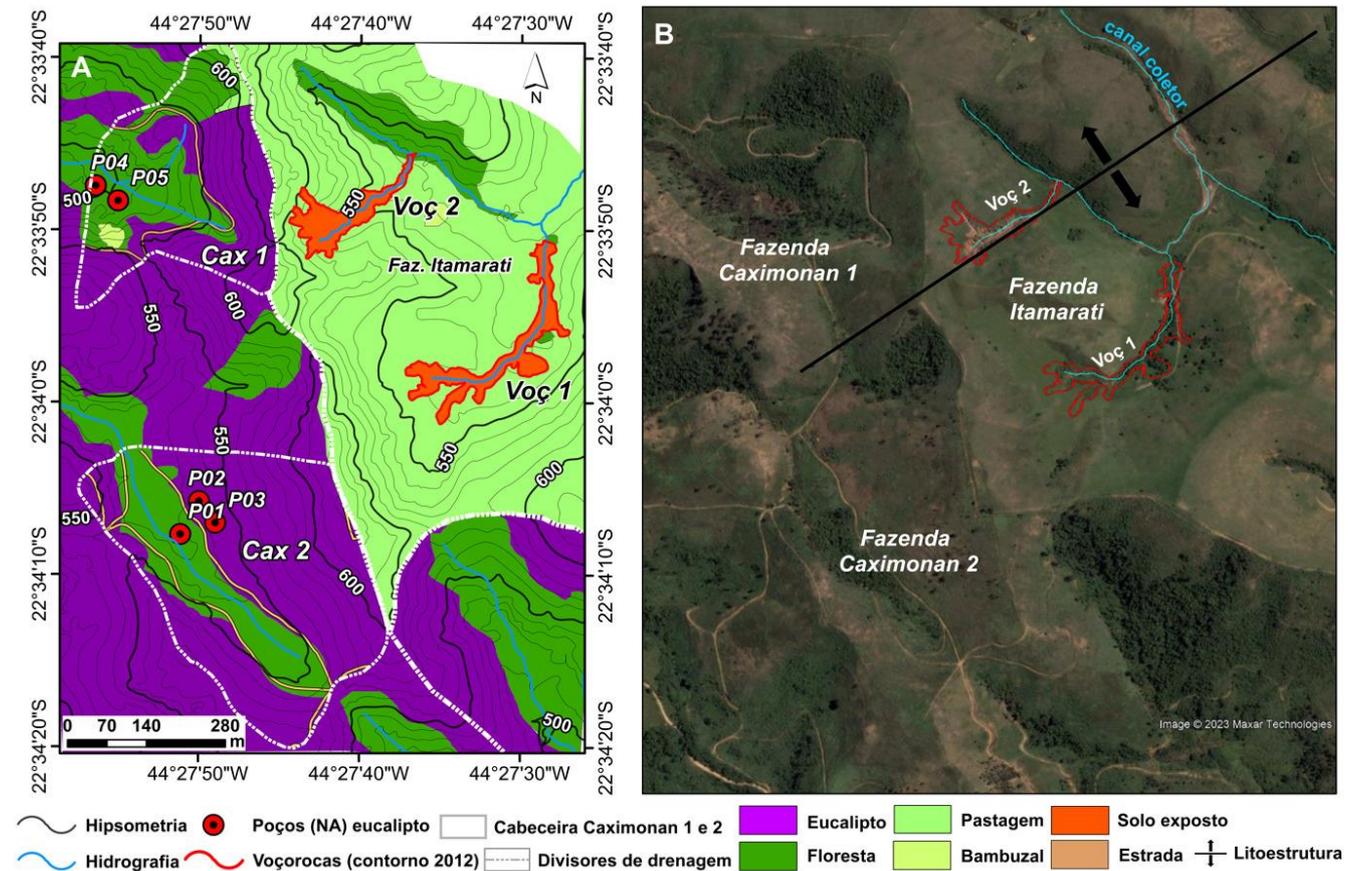


Figura 12. À esquerda - Carta topográfica e cobertura vegetal nas fazendas Caximonan (à esquerda do divisor principal de águas) e na fazenda Itamarati (pastagem); destaque das sub-bacias de plantio de eucalipto e monitoramento das águas subsuperficiais (Cax 1 e Cax 2); as voçorocas 1 e 2, em vermelho, mostram o recorte de 2012. À direita - Foto imagem da mesma área em 2003, antes do plantio de eucalipto (2004), ressaltando as voçorocas 01 e 02 na extensão da rede de canais; a vegetação arbórea no fundo dos canais erosivos indicam estabilidade; o contorno em vermelho retrata o ano de 2012. As setas e linha preta indicam o eixo de uma anticlinal subjacente.

Ainda na Figura 12 pode-se observar que a atividade erosiva na voçoroca 02 se aproxima do divisor de águas com o vale de cabeceira Cax 1, abrindo em leque na baixa-média encosta e conduzindo, desse modo, o recuo e o alargamento da cabeceira do vale; nas bordas laterais do canal inciso a erosão atinge a baixa-encosta, num processo de alargamento do fundo de vale. A voçoroca 01, por sua vez, situa-se na vertente oposta aos dois vales de cabeceiras com plantios de eucalipto (Cax 1 e Cax 2), prevalecendo um desdobramento da erosão linear em canais-dígitos com a abertura do fundo de vale na forma de um anfiteatro em estágio evolutivo mais avançado do que na cabeceira da voçoroca 02.

A Figura 13 permite uma visão mais detalhada das duas voçorocas focalizadas neste estudo, ressaltando suas feições morfológicas em diferentes tempos: antes dos plantios de eucalipto (2003) e após os plantios na fazenda Caximonan, em 2010; a linha vermelha refere-se ao contorno da voçoroca no primeiro ano de monitoramento (2012). Percebe-se por essas imagens que o recuo da voçoroca 02 entre 2010 e 2012 foi relativamente curto, tendo sido mais efetivo nos primeiros anos após o plantio de eucalipto. Porém, nesse mesmo período, o recuo da voçoroca 01 foi mais pronunciado, como atestam as respectivas taxas de erosão que serão vistas adiante. Em ambos os casos, nesse mesmo período, a atividade erosiva foi mais restrita nas bordas dos canais incisos onde prevaleceu o assoreamento da carga excessiva de sedimentos provenientes da atividade erosiva à montante.

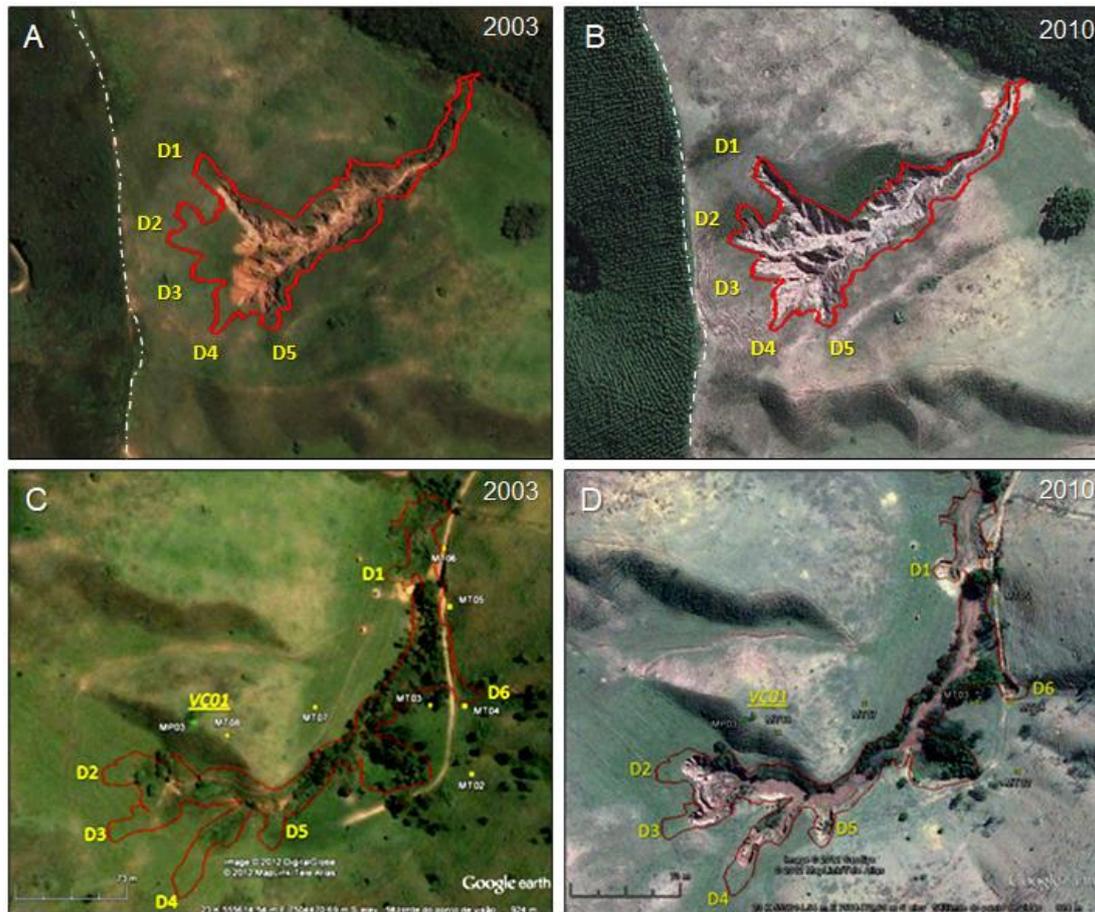


Figura 13. Voçorocas 01 e 02 em diferentes tempos: A- Voçoroca 02 antes do plantio de eucalipto no vale de cabeceira adjacente (2004); B- Imagem da voçoroca 02 no ano 2010; C- Voçoroca 01 antes do plantio de eucalipto nos dois vales de cabeceiras adjacentes (2004); D- Voçoroca 01 no ano 2010. As linhas de contorno em vermelho mostram o recorte das voçorocas no ano 2012 e em amarelo, os dígitos das voçorocas. Crédito das imagens de satélite: *Google Earth Pro / Maxar Technologies*.

4.2.2 Mecanismos de erosão e crescimento regressivo das voçorocas

No interior das voçorocas 01 e 02 observou-se, em campo, que a exfiltração de água subterrânea ocorre durante todo o ano no fundo dos canais incisos, sustentando um fluxo d'água permanente mesmo em períodos de estiagens ou baixos índices pluviométricos, confirmando, em ambos os casos, a contribuição do aquífero permanente que é alimentado pelas chuvas distribuídas regionalmente. Além da exfiltração contínua de água subterrânea no fundo do canal erosivo, também foi observado a ocorrência de exfiltração temporária na zona de solos não-saturados, tanto nas bordas dos canais incisos das voçorocas 01 e 02, como também na baixa-média encosta da cabeça da voçoroca 02, em ambos os casos alimentados pelo regime de chuvas locais.

A Figura 14 mostra em detalhe a porção superior da voçoroca 01 (Figura 14A) cuja área de contribuição é adjacente aos plantios de eucalipto da fazenda Caximonan, sendo capaz de capturar os fluxos d'água subterrâneos provenientes dessa área vizinha, aumentando o fluxo d'água nas faces de exfiltração das bordas internas dos canais-dígitos e no fundo do canal da voçoroca. Vale notar na Figura 14B que, ao menos entre 2012 e 2014 a atividade erosiva concentrou nos canais dígitos D2, D3 e D4, cujas cabeças crescem regressivamente em direção aos plantios de eucalipto, enquanto D1 e D5 permanecem estáveis, sugerindo uma restrição no alcance dos fluxos d'água provenientes da área de contribuição à montante. A área total erodida nos dígitos D2, D3 e D4, nesse período de dois anos, foi de 748,8 m² e o recuo total dos três canais-dígitos alcançou 37,34 m. Evidências de campo indicam que o trabalho erosivo que conduz a evolução da voçoroca 01 resulta, primariamente do excesso de propressão nas faces de exfiltração da água subterrânea, impulsionando a erosão por vazamento (*seepage erosion*) como estudado em detalhe na bacia do rio Bananal (COELHO NETTO, 2003; ROCHA-LEÃO et al., 2005; COELHO

NETTO; FERNANDES, 1990). Esse mecanismo propicia a formação de entubamentos (*piping*) cujo crescimento interno conduz à formação de túneis erosivos os quais, atingindo um certo tamanho, provocam o colapso do material sobrejacente. As Figuras 14 C e 14 D mostram a ocorrência das feições morfológicas de tuneis erosivos e dos materiais colapsados, evidenciando também a contribuição dos fluxos temporários durante os períodos chuvosos.

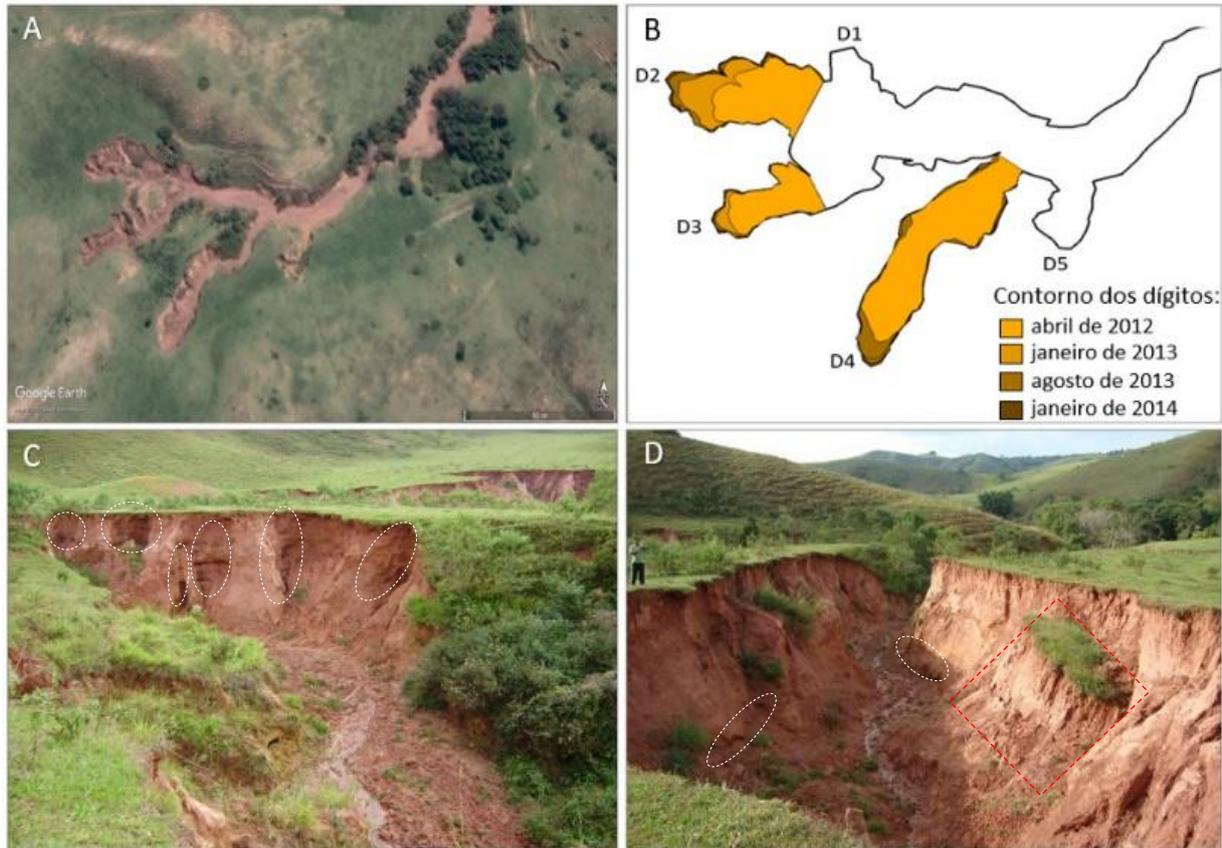


Figura 14. Atividade erosiva na voçoroca 01 da fazenda Itamarati: A- Foto-imagem da porção superior do canal erosivo e dos canais-dígitos; B-Variações do contorno da voçoroca 1 entre os anos de 2010-2012; C- Cabeça do canal-dígito 4 com destaque dos tuneis erosivos (linha tracejada branca) na zona não-saturada e, D- Vista de montante para jusante da voçoroca 1 evidenciando os tuneis erosivos ao longo da borda inferior do canal (linha tracejada branca) e o material colapsado (retângulo tracejado vermelho).

Na Tabela 9 percebe-se que a taxa de crescimento em área, no período total (2012 a 2014) foi maior no canal-dígito D2 (19,2 m²/mês), seguido por D4 (11,1 m²/mês) e menor em D3 (4,2 m²/mês), os quais apresentaram uma taxa de recuo médio de 0,92 m/mês, 0,52 m/mês e 0,31 m/mês, respectivamente. Vale destacar que durante este período amostral as taxas de erosão foram decrescendo nos três dígitos; nos dois últimos períodos, D3 manteve baixos valores e próximos entre si. Observando o histograma de chuvas mensais visto na Figura 15 percebe-se que o primeiro período de monitoramento apresentou as maiores taxas de erosão apesar do menor volume de chuvas acumuladas, em comparação aos períodos seguintes mais chuvosos. Este fato sugere, mais uma vez, uma contribuição adicional de fluxos d'água, possivelmente por *pirataria de água subterrânea* do vale de cabeceira adjacente, com plantio de eucalipto, na fazenda Caximonan, tal como visto e modelado fisicamente na bacia do rio Bananal (LEAL; COELHO NETTO; AVELAR, 2015).

Tabela 9. Estimativa da taxa de evolução dos dígitos ativos da voçoroca 01.

| Dígitos | Período (meses) | Intervalo (dias) | Cresc. área (m ²) | Taxa em área (m ² /mês) | Recuo da cabeça do dígito (m) | Taxa de recuo da cabeça do dígito (m/ mês) |
|---------|--------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|
| D2 | abr/12 a jan/13 | 275 | 295,1 | 32,2 | 14,9 | 1,63 |
| | jan/13 a ago/13 | 212 | 84,8 | 12,0 | 3,7 | 0,53 |
| | ago/13 a jan/14 | 152 | 42,3 | 8,3 | 1,1 | 0,22 |
| | Total dígito 2 | 639 | 422,2 | 19,2 | 19,7 | 0,92 |
| D3 | abr/12 a jan/13 | 275 | 56,0 | 6,1 | 5,60 | 0,61 |
| | jan/13 a ago/13 | 212 | 19,1 | 2,7 | 0,49 | 0,07 |
| | ago/13 a jan/14 | 152 | 14,6 | 2,9 | 0,47 | 0,09 |
| | Total dígito 3 | 639 | 89,7 | 4,2 | 6,56 | 0,31 |
| D4 | abr/12 a jan/13 | 275 | 147,9 | 16,1 | 8,05 | 0,88 |
| | jan/13 a ago/13 | 212 | 72,5 | 10,3 | 1,61 | 0,23 |
| | ago/13 a jan/14 | 152 | 16,5 | 3,3 | 1,42 | 0,28 |
| | Total dígito 4 | 639 | 236,9 | 11,1 | 11,08 | 0,52 |
| Total | abr/12 a jan/14 | 639 | 748,8 | 35,2 | 37,34 | 1,75 |

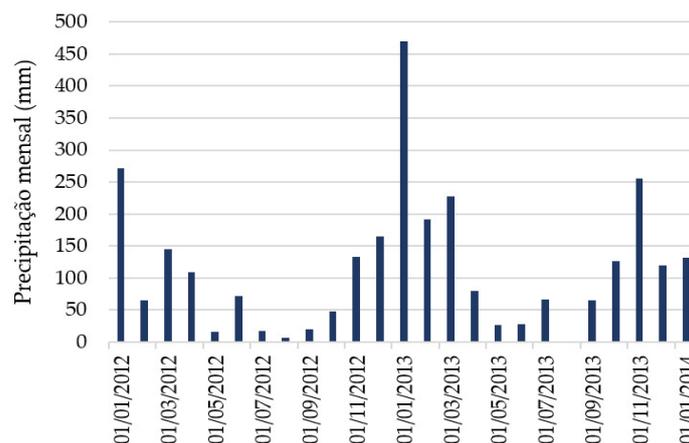


Figura 15. Precipitação mensal durante o período de monitoramento de campo (2012 e 2014) da estação UHE Funil Resende Aeroporto (código ANA 2244161).

Os sedimentos colapsados na evolução dos túneis erosivos permanecem estocados no fundo do canal por um determinado tempo, ocultando as faces de exfiltração na porção inferior das bordas dos canais incisos e, portanto, interrompendo, temporariamente, o mecanismo de erosão associado ao crescimento dos tuneis, tal como foi observado anteriormente por Coelho Netto e Fernandes (1990) na bacia do rio Bananal. Esse mecanismo erosivo é reativado no mesmo local após a remoção do material colapsado por escoamento superficial, particularmente durante as chuvas subsequentes que produzem o chamado “efeito cachoeira” (*waterfall effect*, segundo ROSE et al., 2014; e SIDLE et al., 2019), como pode ser visto na Figura 16.



Figura 16. Detalhe do escoamento superficial durante um evento chuvoso: A- Escoamento superficial de encosta convergindo para o canal erosivo da voçoroca 1; B- “Efeito Cachoeira” na cabeça do canal dígito e remoção dos sedimentos colapsados; C- Escoamento superficial concentrado no canal erosivo e estocagem de sedimentos relacionados ao processo de voçorocamento.

A voçoroca 02 vem se desenvolvendo em um vale de cabeceira relativamente menor do que o vale da voçoroca 01, prevalecendo um trabalho erosivo de espraiamento lateral e remontante, ao longo do canal e na cabeça da voçoroca (Figura 17A). Além de apresentar uma superfície de solo exposto mais abrangente e favorecendo a produção de escoamento superficial do tipo hortoniano (Horton, 1945), também prolifera a ocorrência de inúmeros túneis erosivos como pode ser visto na Figura 17B e em maior detalhe, na Figura 17C. Esses túneis erosivos e respectivos colapsos, que respondem pelo recuo da baixa-média encosta também propiciam o avanço da erosão em direção ao divisor com o vale de cabeceira Cax 1. A redução progressiva da área de contribuição à montante é notória, e o fato de não inibir o trabalho erosivo, igualmente sugere uma contribuição adicional do fluxos d’água do vale de cabeceira vizinho, alimentando a produção de um aquífero temporário e suspenso proveniente do vale vizinho onde o plantio de eucalipto intensificou a infiltração na encosta (Cax 1).



Figura 17. Atividade erosiva na voçoroca 02 da fazenda Itamarati: (A) Imagem de satélite do canal inciso da voçoroca 2 em 2010 e do espraiamento da erosão na baixa-média encosta com múltiplos dígito dissecando o vale em forma de anfiteatro; (B) Fotografia da porção superior da voçoroca em 2010 e (C) Fotografia com detalhe dos túneis erosivos. Crédito das imagens de satélite da figura (A): *Google Earth Pro / Maxar Technologies* e fotografias (B e C): Anderson Sato.

4.2.3 Evolução do processo erosivo e estabilização das voçorocas

A análise do processo evolutivo das voçorocas baseia-se na comparação das imagens de satélite, acompanhadas por observações de campo. A Figura 18 mostra a evolução da voçoroca 01 na coluna à direita e a voçoroca 02 na coluna à esquerda. Como mencionado anteriormente, em 2003, a voçoroca 01 estava estabilizada e com vegetação arbórea no seu interior enquanto a voçoroca 02 ainda apresentava pequena área de solo exposto na baixa encosta e bordas laterais, mais íngremes, sugerindo alguma atividade erosiva. Entretanto no período imediatamente após os plantios de eucalipto na fazenda Caximonan, em meados de 2004, ambas apresentaram um crescimento regressivo mais intenso nos primeiros anos e uma redução da área erodida no período do monitoramento de campo entre 2012 e 2014, principalmente na voçoroca 02 a qual permaneceu com poucas alterações aparentes nos anos seguintes. Nessa mesma figura percebe-se que, embora a voçoroca 01 tenha

expandido regressivamente no período seguinte, em 2016 já se pode observar uma retomada do processo de revegetação no canal-dígito mais longo, orientado para noroeste em direção ao vale de cabeceira Cax 1; o mesmo se observa nos pequenos canais-dígitos da voçoroca 02. Em 2023 pode-se observar a expansão da revegetação no interior das duas voçorocas, fortalecendo a ideia de que ambas estão evoluindo para uma condição de estabilidade.

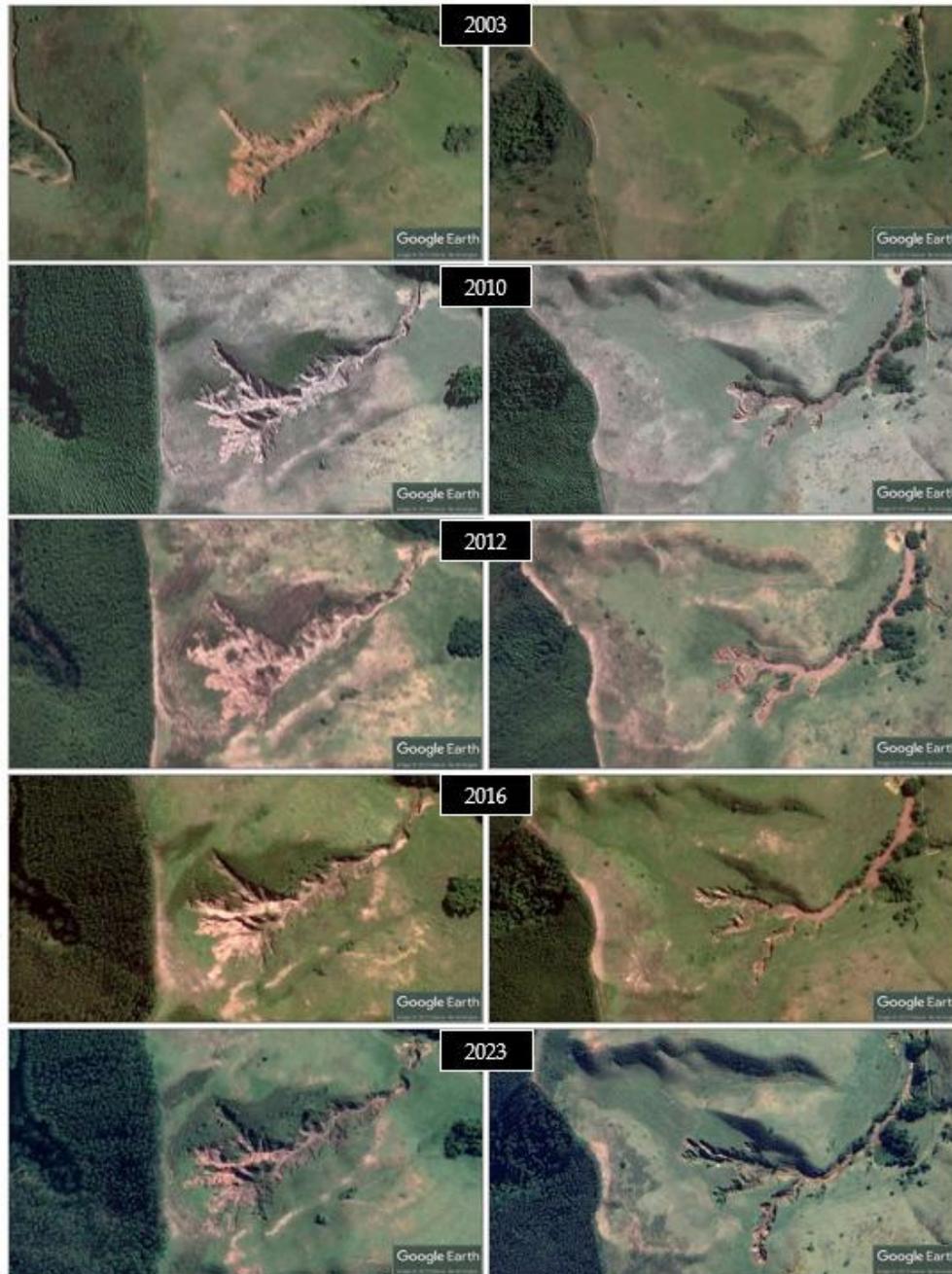


Figura 18. Variações da configuração morfológicas das voçorocas 01 e 02 entre os anos 2003 e 2023 ilustrando o ciclo de atividade erosiva e a tendência em curso de estabilização e o conseqüente retorno da vegetação.

Os dados contidos na Tabela 10 confirmam essa tendência de um processo evolutivo em direção à uma nova condição de estabilidade, como indica a redução progressiva da área erodida nas duas voçorocas. Entre o início do plantio e o ano 2010 a taxa de erosão relacionada ao crescimento da voçoroca 01 foi da ordem de 1.948,57 m²/ano; entre 2010 e 2012 essa taxa caiu para 1.253,06 m²/ano; posteriormente reduziu para 356,35 m²/ano e, no último período foi de apenas 126,14 m²/ano. Na voçoroca 02 as taxas de erosão alcançaram valores inferiores, variando em torno de 769,55 m²/ano entre o início do plantio e o ano 2010; essa taxa reduziu para 344,93 entre 2010 e 2012, seguindo-se uma taxa menor entre 2012 e 2016 (154,88 m²/ano), apresentando-se praticamente estável no último

período, entre 2016 e 2023, com uma taxa em torno de apenas 13,11 m²/ano. Confirmando essa tendência, verificou-se que no ano de 2023 a cobertura de vegetação no interior das voçorocas cobriu uma área de 2.056,89 m² na voçoroca 01 e 795,42 m² na voçoroca 02.

Tabela 10. Área total erodida (m²) em diferentes intervalos de tempo e respectivas taxas de erosão (m²/ano) nas voçorocas 01 e 02 no período entre 2004-2010, 2010-2012, 2012-2016 e 2016-2023.

| | | 2003 / 2004 | 2010 | 2012 | 2016 | 2023 |
|---|----------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Área total (m²) | Voço. 01 | 1.612,69 | 13.304,13 | 15.810,26 | 17.235,67 | 18.118,68 |
| | Voço. 02 | 5.243,47 | 9.860,77 | 10.550,64 | 11.170,17 | 11.261,94 |
| | | | 2004 a 2010 | 2010 a 2012 | 2012 a 2016 | 2016 a 2023 |
| Taxa de erosão (m²/ano) | Voço. 01 | | 1.948,57 | 1.253,06 | 356,35 | 126,14 |
| | Voço. 02 | | 769,55 | 344,93 | 154,88 | 13,11 |

*a taxa de erosão foi calculada a partir de 2004, devido ao ano de introdução dos plantios de eucalipto na área estudada.

4. Discussão

As encostas com plantios de eucalipto mostraram-se mais favoráveis a infiltração de água no solo, do que as áreas de gramíneas com pastagem. Isto resulta, em parte, da interferência da espessa camada de serrapilheira do eucalipto (MELOS; SATO; COELHO NETTO, 2010) que, além de absorver parte da chuva, propicia sua transferência gradual para o solo numa taxa inferior à sua capacidade de infiltração, como observado por Coelho Netto (1987) em floresta Tropical Úmida. Por outro lado, a concentração das águas de chuvas junto aos troncos de eucalipto (SATO; AVELAR; COELHO NETTO, 2011), aliada com a percolação preferencial da água de chuva junto às raízes arbóreas pivotantes, resulta no molhamento mais efetivo em profundidade, até a base das raízes, antes mesmo do avanço da frente de umidade na matriz do solo. Este comportamento também foi observado em florestas heterogêneas (Tropical Úmida e secundária) localizadas em outros ambientes montanhosos do Rio de Janeiro (SILVEIRA et al., 2005). Em contraste, as pastagens de *Brachiaria* apresentam uma capacidade de infiltração inferior, provavelmente em função da compactação do solo pelo pisoteio do gado (SILVA et al., 2019) e de um sistema radicular menos denso e mais raso, favorecendo a produção do escoamento superficial.

A concentração da água de chuva junto aos troncos de eucalipto, no processo de atravessamento, resulta numa precipitação terminal no solo com valores superiores ao mensurado em área aberta, atingindo uma precipitação terminal que, em média, é 160% maior do que a chuva precipitada acima das copas arbóreas, podendo atingir pontualmente valores máximos até 567% em dias mais chuvosos (SATO; AVELAR; COELHO NETTO, 2011). O sistema radicular pivotante, por seu turno, propicia uma rápida percolação da água e reduções bruscas de sucção a 150 cm, ou seja, na profundidade terminal da raiz arbórea, inferior a -50 kPa. Nas encostas sob gramíneas, o sistema radicular fasciculado e concentrado até 40 cm de profundidade propicia, por um lado, o aumento da condutividade hidráulica, mas também cria uma descontinuidade abaixo da zona de raízes, favorecendo a saturação dessa camada superior e incrementando o escoamento superficial por saturação (CAMBRA; COELHO NETTO, 2000). Estudos como o de Freire Allemão (1997), Jansen (2001) e Silveira (2004) em fragmentos florestais de Mata Atlântica reafirmam o papel das raízes finas e grossas como vias preferenciais de percolação da água de chuva no perfil do solo, podendo atingir a saturação na base da raiz.

O comportamento da sucção observado no início da estação chuvosa em 150 cm de profundidade na encosta com eucalipto, decrescendo próximo a zero na primeira chuva após um período longo de estiagem, entre outubro e novembro de 2015, reforça a ideia de percolação preferencial da água junto às raízes pivotantes. No entanto, o maior atraso na variação da sucção nas demais profundidades, mesmo com a entrada de sucessivas chuvas nesse mesmo período, sugere um efeito de tamponamento promovido pela alta capacidade de estocagem da água de chuva na espessa camada de serrapilheira do eucalipto. Esse efeito poderia ser rompido após um certo acumulado de chuvas, o que pode variar em função das condições de umidade antecedente.

A amplitude de variação no comportamento da sucção em plantios de eucalipto, em todas as profundidades analisadas, pode estar relacionada com maiores perdas por evapotranspiração associada, possivelmente, ao maior índice de área foliar e biomassa. Zhou et al. (2002) no sul da China, observaram que a umidade no solo é menor

nas áreas plantadas com espécies *Eucalyptus* do que em áreas com solo exposto, devido à absorção de água pelas raízes. Por outro lado, os solos com cobertura de gramínea e menores amplitudes de variação no comportamento médio da sucção, revela uma condição mais úmida do solo, especialmente em maiores profundidades (Figura 7). Este último resultado corrobora com os estudos de Marques et al. (2018) na região serrana do Rio de Janeiro, onde foi constatado nas encostas com gramíneas que a saturação de água no solo se sustenta em profundidade, abaixo de 100 cm, mesmo durante longos períodos de estiagem, por restrição da evapotranspiração na ausência de raízes em profundidade.

Nas encostas cobertas por gramíneas, os valores de sucção nas menores profundidades (20 e 50 cm) oscilaram de acordo com a incidência de chuva, entretanto perderam umidade com maior facilidade devido ao processo de evapotranspiração. É relevante observar que a estação G1, situada na encosta adjacente ao plantio de eucalipto, apresentou os menores valores de sucção em maiores profundidades (150, 200 e 300 cm), do que nas encostas com gramínea (G2) sem influência desses plantios na sua vizinhança, sugerindo a ocorrência de migração dos fluxos d'água subsuperficiais oriundos da encosta com plantio de eucalipto. Fortalece essa ideia o fato de que o vale de cabeceira com plantio de eucalipto está numa posição topográfica mais elevada do que o fundo de vale da cabeceira G1, favorecendo a migração de fluxos d'água subterrâneos do vale com eucalipto e, assim, aumentando, a descarga de água nas faces de exfiltração e o trabalho erosivo na média-baixa encosta da cabeceira G1.

As variações altimétricas do NA entre os vales de cabeceiras adjacentes, influenciam no gradiente hidráulico entre eles, favorecendo o direcionamento dos fluxos de água subterrâneos em direção ao fundo de vale mais dissecado, ou seja, rebaixado pela incisão crescente do canal erosivo do tipo voçoroca (LEAL et al., 2015). No presente estudo, observou-se que o NA mais elevado no vale de cabeceira Cax.2, em relação aos dois vales vizinhos onde se desenvolvem as voçorocas 01 e 02, contribuiu para a reativação erosiva nessas duas voçorocas após o aumento da infiltração com o plantio de eucalipto nas encostas de Cax.2. Vale destacar que o NA em todos os poços monitorados na estação Cax2 (elevação média do NA P1= 522 m; P2 = 523 m; P3 = 528 m) estão mais elevados em relação aos fundos de vales com incisão ativa nas voçorocas.

O sincronismo no movimento ascendente do NA em todos os poços, independente da profundidade e altimetria dos mesmos, sugere que os fundos de vales de cabeceiras de drenagem são influenciados pela dinâmica do aquífero regional, além do comportamento hidrológico nas encostas e das chuvas locais. Essa regulação do aquífero regional também foi observado na bacia do rio Bananal onde as variações de nível d'água subsuperficial, assim como as cargas piezométricas, respondem às chuvas no âmbito regional e com atrasos similares, variando entre 2 e 4 meses (FONSECA et al., 2006; LEAL et al., 2015). Coelho Netto (1999) aponta que o elevado gradiente topográfico observado nas bacias do rio Bananal (0,040 adimensional) e na bacia do rio Sesmaria (0,055 adimensional) favorece a geração de fluxos artesianos, através do fraturamento das rochas, com cargas piezométricas mais elevadas ao longo dos eixos dos vales de cabeceiras, particularmente no domínio de colinas. Esses fluxos artesianos são os responsáveis primários pela formação e expansão dos canais incisivos do tipo voçoroca, que crescem regressivamente ao longo dos eixos de vales como no caso das voçorocas 01 e 02. Este fato, entretanto, não exclui os efeitos da recarga local favorecida pelos plantios de eucalipto, tanto localmente como na migração lateral para os vales vizinhos, aumentando a taxa de exfiltração na baixa-média encosta, como visto no caso da voçoroca 02; ou seja, potencializando os fluxos d'água subsuperficiais temporários e mais rasos nos períodos chuvosos, como observado nos inúmeros pontos ou faces de exfiltração, intensificando o trabalho erosivo e o recuo da encosta.

Leal, Coelho Netto e Avelar (2015) em estudo nas áreas de pastagem da bacia do rio Bananal modelaram fisicamente o comportamento dinâmico da rede de fluxos d'água subterrâneos, entre vales de cabeceiras adjacentes com variações espaciais e temporais do gradiente hidráulico em resposta à expansão da rede de canais, denominando essa migração de fluxos entre vales adjacentes de "pirataria de água subterrânea" como indutor da aceleração das taxas de recuo dos canais de voçorocas. Leal (2009) observou que a pirataria de água subterrânea pode acontecer entre vales de cabeceiras com baixo desnivelamento altimétrico, dependendo apenas da quantidade de água disponível no sistema. De fato, observou-se no dígito D4, que cresce obliquamente em direção ao divisor topográfico, que faz o limite com a fazenda Caximonan, um trabalho erosivo mais efetivo na sua borda lateral esquerda do que na borda à direita, evidenciado pela ocorrência de inúmeros túneis erosivos que atestam a maior descarga de água na face de exfiltração e, maior taxa de recuo da cabeça da voçoroca (Figura 13B).

As taxas de evolução dos dígitos da voçoroca 01 foram significativamente mais altas do que na voçoroca 02, tanto linearmente quanto em área (Tabela 9). Para efeito comparativo, um levantamento feito por Bull e Kirkby

(1997) sobre a média das taxas de expansão remontante das cabeças das voçorocas, em diferentes áreas de estudos, indicou que estas podem expandir até 6 m por ano. Essas taxas são inferiores às taxas observadas neste estudo, expressando que a magnitude do trabalho erosivo, reativado com a mudança no uso da terra, pode alcançar valores acima do comportamento esperado, revelando que o modo de intervenção no uso da terra ultrapassou o limiar de sua capacidade suporte.

Na evolução da voçoroca 02, a participação do aquífero regional permanente no fundo do canal erosivo expressa uma conexão com as chuvas no âmbito regional, enquanto na baixa-média encosta a participação do aquífero suspenso, temporário, opera em resposta direta das chuvas locais. Os fluxos d'água subterrâneos permanentes operam o trabalho erosivo principalmente no fundo dos canais incisos e, embora o ritmo de suas flutuações seja sincronizado entre os vales de cabeceiras, os volumes e níveis d'água desses vales não são espacialmente uniformes. Localmente, os plantios de eucalipto favorecem a infiltração e a recarga local desses aquíferos, os quais podem ativar o trabalho erosivo tanto por exfiltração do aquífero regional no fundo do canal inciso, como nas bordas desse canal e na baixa-média encosta da cabeceira do vale.

As voçorocas estudadas neste trabalho ressaltam que as taxas de erosão variáveis, observadas ao longo de duas décadas, evidenciaram uma resposta mais intensa logo após o plantio de eucalipto nos vales de cabeceiras adjacentes da fazenda Caximonan, a qual foi decrescendo progressivamente ao longo do período amostral entre 2004 e 2023. Se por um lado a reativação erosiva respondeu de imediato à mudança no uso da terra por alterações no regime hidrológico entre as encostas dos vales de cabeceiras adjacentes, por outro, a redução progressiva das taxas de erosão revela a busca de um novo ajuste interno do sistema hidro-geomorfológico, ou seja, de uma nova condição de estabilidade. A reativação erosiva das voçorocas 01 e 02, conseqüente do desajuste interno provocado pela mudança no sistema de drenagem é, portanto, um processo temporário que, no caso estudado, foi e ainda está sendo em torno de duas décadas.

Vale ressaltar, entretanto, que outras faces de exfiltração da água subterrânea também são observadas em cortes de estradas onde, na ausência de obras eficientes de drenagem, observa-se a erosão por excesso de pressão da água nas faces de exfiltração. Observações de campo realizadas na estrada Queluz-Areias (SP-058) no estado de São Paulo atestam a ocorrência deste mecanismo de erosão, abrindo túneis erosivos e colapsos pontuais, mas também induzindo deslizamentos, particularmente ao longo do eixo de uma concavidade topográfica ou vale de cabeceira como ilustrado na Figura 19. A Figura 19A mostra o plantio de eucalipto na porção superior da encosta, com dois anos de idade, abaixo do qual foi feito um corte para construção da estrada e com acabamento em forma de terraços para controle de erosão superficial, ignorando-se uma drenagem eficiente do escoamento subterrâneo temporário, cuja exfiltração acarretou inúmeros tuneis erosivos, seguidos por colapsos de terra, e ainda, por escorregamento de terra no eixo do vale de cabeceira de drenagem. Outro caso pode ser visto na mesma Figura 15B, numa outra fazenda situada na bacia do rio Sesmaria, cujo avanço regressivo dos canais-dígitos de uma voçoroca de fundo de vale atingiu a baixa-média encosta, chegando junto da porção superior com plantios de eucalipto.

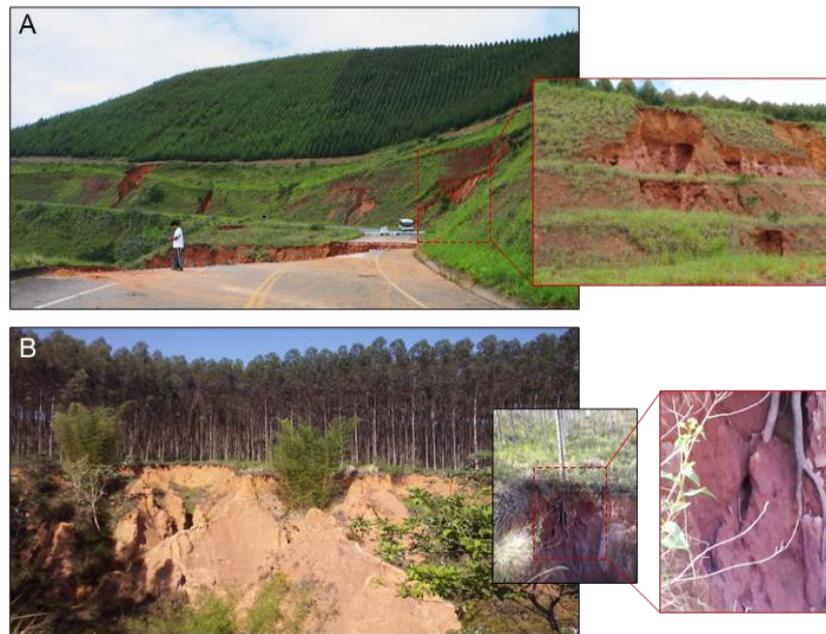


Figura 19. Erosões por vazamentos de escoamentos subterrâneos (temporários) à jusante dos plantios de eucalipto. (A) Estrada Queluz-Areias (SP-058) com ocorrência de deslizamento; (B) Evolução de dígitos erosivos seguindo orientação do alinhamento do plantio expondo o sistema radicular do eucalipto em outra fazenda a montante da área monitorada por este estudo, na bacia do rio Sesmarias.

5. Conclusões

Os estudos conduzidos no domínio de colinas da bacia do Sesmarias permitem concluir que, diferente das florestas heterogêneas, dentro dos plantios de eucalipto a concentração da chuva junto ao tronco arbóreo, aliado a percolação preferencial da água junto as raízes arbóreas pivotantes, propicia uma rápida injeção da água de chuva e recarga dos aquíferos, temporário e permanente. Por outro lado, a camada de serrapilheira produzida pelo eucalipto, com capacidade de retenção de água similar ao observado em floresta tropical úmida de encosta, porém bem mais espessa pela redução artificial da fauna decompositora (uso de pesticidas químicos durante o plantio), contribui no atraso do avanço da frente de umidade na matriz do solo. Sob tais condições, a baixa produção de escoamento superficial nas encostas restringe a atividade erosiva por salpico de gotas e lavagem superficial nas encostas plantadas, a qual fica restrita às estradas de terra batida usadas para o plantio e colheita da madeira. Configura-se, portanto, como um ambiente favorável aos mecanismos de erosão por ação do escoamento subsuperficial ou subterrâneo (temporário e/ou permanente) como, de fato, se observa na reativação erosiva das voçorocas de crescimento regressivo e, em grande parte, conectadas na expansão da rede regional de canais.

No comportamento hidrológico das encostas monitoradas em plantios de eucalipto e nas gramíneas com pastagem extensiva (cobertura antecedente aos plantios) ficou evidente a mudança na estocagem de água no solo: as gramíneas, com enraizamento fasciculado e concentrado nos primeiros 40 cm de profundidade restringem as perdas d'água por evapotranspiração e favorecem a estocagem de água em profundidades maiores, mesmo em períodos de estiagens prolongadas, sustentando valores mais baixos de sucção do que nos plantios de eucalipto. Estes, por sua vez, se aproximam do comportamento observado em florestas heterogêneas (Tropical Úmida secundária) com rápidas e maiores amplitudes de variação da sucção no perfil do solo assim como nas flutuações do nível d'água subterrânea. Esses níveis d'água variam entre os vales de cabeceiras e, internamente, apresentam o NA mais próximo da superfície do terreno nos fundos de vales como esperado.

As variações locais do NA revelaram a importância do gradiente hidráulico entre os vales de cabeceiras adjacentes no direcionamento da rede de fluxos d'água subterrânea, convergindo os fluxos em direção aos vales onde a incisão linear dos canais de voçorocas resultaram no rebaixamento do fundo de vale e, portanto, do nível freático, propiciando a transferência de fluxos entre vales adjacentes, denominada "pirataria de água subterrânea", tal como foi definida na bacia do rio Bananal por Leal, Coelho Netto e Avelar (2015). Significa, portanto que, a mudança de uso da terra com plantios de eucalipto que potencializou a injeção de água no solo e ativou ou reativou o crescimento das voçorocas, também alterou a rede de fluxos subterrâneos intensificando a erosão nas faces de exfiltração

e, especialmente, nos fundos de vales. Nesse sentido, as voçorocas já estabilizadas, ou em vias de estabilização no fundo dos vales também contribuíram para suas reativações, retroalimentando o sistema regulador do trabalho erosivo que responde pela formação e pela reativação dos canais incisos. Isto ilustra que as formas superficiais são ao mesmo tempo resultantes e condicionantes de sua evolução, sem excluir o surgimento de novos canais incisos do tipo voçoroca, como foi observado após o plantio de eucalipto.

Respondendo ao aumento da infiltração após esses plantios, os aquíferos temporários e suspensos também podem ativar novos focos de erosão por excesso de poro-pressão nas faces de exfiltração, formando túneis erosivos que colapsam após um certo desenvolvimento. Mesmo na baixa-média encosta, íngreme, podem surgir novas faces de exfiltração acionando pontualmente a erosão, mas geralmente em solo exposto, naturalmente ou por intervenção humana como observado na área de estudo e em cortes de estrada à jusante dos plantios de eucalipto.

Por fim, vale destacar que as mudanças no uso da terra, como visto neste estudo, induziram alterações significativas nos processos hidro-erosivos, intensificando as taxas de erosão e assoreamento na rede de canais, resultando em efeitos nocivos em curtas e longas distâncias. Entretanto, essa reativação e intensificação do trabalho erosivo tem um prazo de reajuste do sistema de drenagem na busca por um novo período de estabilidade, como visto através das taxas decrescentes de erosão monitoradas neste estudo. As indicações de mais um período de estabilidade revelam o caráter descontínuo, ou episódico, no processo evolutivo da rede de canais, o que pode ser consequência de um novo ajuste de declives entre vales de cabeceiras adjacentes e/ ou ajuste ao novo ambiente.

Contribuição dos autores: FACADIO, A.C.C. – Conceção, Metodologia, Validação, Investigação, Redação – versão inicial, Redação – revisão e edição; SATO, A.M. – Conceção, Metodologia, Validação, Investigação, Redação – revisão e edição; COELHO NETTO, A.L. – Conceção, Metodologia, Validação, Investigação, Recursos, Redação – revisão e edição, Supervisão, Administração do projeto e Aquisição de financiamento.

Financiamento: Este trabalho foi realizado no âmbito do INCT-MCTI/CNPq/CAPES/FAPs nº 16/2014: INCT-REAGEO/ Instituto Geotécnico para Reabilitação do Sistema Encosta-Planície e Desastres Naturais; com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do edital CNPq Universal 14/2011 - Faixa B (Processo nº 480.293/2011-2); apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) através dos editais FAPERJ 11/2012 Meio Ambiente (Processo nº E-26/111.364/2012) e do Programa Cientista do Nosso Estado FAPERJ (Processo nº E-26/102.791/2008), assim como das bolsas de doutorado, mestrado e iniciação científica concedidas pelo CNPq e FAPERJ.

Agradecimentos: Os autores agradecem aos revisores do artigo pelas contribuições apresentadas.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

Referências

1. ALBAUGH, J. M.; DYE, P. J.; KING, J. S. Eucalyptus and water use in South Africa. **International Journal of Forestry Research**, v. 2013, article ID 852540, 11 pag., 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/852540>.
2. ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V.; LANDSBERG, J. L.; REZENDE, G. D. Water use and yields of Eucalyptus grandis hybrids plantations in Brazil during a rotation for Pulp production. **INPE ePrint**, v. 80, n. 2006, p. 07-25, 2006.
3. AVELAR, A. 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, 1992a.
4. AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Fluxos d'água subsuperficiais associados à origem das formas côncavas do relevo. **Anais do 1º COBRAE**, p. 709-719, 1992b.
5. BROWN, A. E.; ZHANG, L.; MCMAHON, T. A.; WESTERN, A. W.; VERTESSY, R. A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of Hydrology**, v. 310, n. 1-4, p. 28-61, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>.
6. BULL, L. J.; KIRKBY, M. J. Gully processes and modelling. **Progress in Physical Geography**, v. 21, n. 3, p. 354-374, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1177/030913339702100302>.
7. CAMBRA, M. F. E. S.; COELHO NETTO, A. L. O papel hidrológico das raízes de gramíneas na porção superior de solos sob pastagem. In: **Anais do III Simpósio Nacional de Geomorfologia**, 2000, Campinas - SP, 2000. p. 151.
8. COELHO NETTO, A.L. **Surface hydrology and soil erosion in a tropical mountainous rainforest drainage basin, Rio de Janeiro**. Phd thesis, Katholieke Univ. Leuven, Belgium, 185p, 1985.
9. COELHO NETTO, A.L. Overlandflow production in a Tropical Rainforest Catchment: the role litter cover. **Catena**, Braunschweig. v. 14, p. 213-231, 1987.

10. COELHO NETTO, A. L. Evolução de cabeceiras de drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 4, p. 69-100, 2003. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v4i2.25>.
11. COELHO NETTO, A.L. Catastrophic Landscape Evolution in a Humid Region (SE Brazil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes. **Supplementi di Geografia** 162 (III), Tomo 3: 21-48, 1999.
12. COELHO NETTO, A. L.; FERNANDES, N. F. Hillslope Erosion Sedimentation and Relief Inversions in Bananal - SP. In: Research Needs and Applications to Reduce Erosion and Sedimentation in Tropical Steeplands, 1990, Suva. **Proceedings of the Fiji Symposium on Research Needs and Applications to Reduce Erosion and Sedimentation in Tropical Steeplands**. v. 192. p. 174-182, 1990.
13. COELHO NETTO, A. L.; FERNANDES, N. F.; DEUS, C. E. Gullying In The Southeastern Brazilian Plateau Bananal - SP. In: **Sediment Budgets**, 1988, Porto Alegre – RS, v. 174. p. 35-42, 1988.
14. DANTAS, M. E; FERNANDES, L. F. R.; AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Caracterização geomorfológica da bacia do rio Sesmarias (SP/RJ) – Médio Vale do rio Paraíba do Sul. In: **9º Simpósio Nacional de Geomorfologia**, UGB - União da Geomorfologia Brasileira, v. 1. p. 1-2, 2012.
15. DIAS, M. A.; COELHO NETTO, A. L. A Influência da Topografia na Distribuição de Manchas de Gramínea em um Fragmento de Floresta Atlântica Urbana Montanhosa Maciço da Tijuca, RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, p. 3-14, 2011. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v12i2.230>.
16. DNAEE. **Normas e recomendações hidrológicas**. Ministério das Minas e Energia. Brasil. 1970.
17. EIRADO SILVA, L. G. A. **A interação entre os eventos tectônicos e a evolução geomorfológica da Serra da Bocaina, Sudeste do Brasil**. Tese (Doutorado) Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro., 2006. 273p.
18. EIRADO SILVA, L. G.; DANTAS, M. E.; COELHO NETTO, A. L. Condicionantes litoestruturais na formação de níveis de base locais (knickpoints) e implicações geomorfológicas no médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ/SP). In: **Simpósio de Geologia do Sudeste**, 3, Rio de Janeiro, p. 96-102, 1993.
19. ENGEL, V.; JOBBÁGY, E. G.; STIEGLITZ, M.; WILLIAMS, M.; JACKSON, R. B. Hydrological consequences of Eucalyptus afforestation in the Argentine Pampas. **Water Resources Research**, v. 41, n. 10, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1029/2004WR003761>.
20. FACADIO, A. C. C. **Plantio de eucalipto e reativação erosiva em vales de cabeceiras de drenagem: Bacia do Rio Sesmarias, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul**. Dissertação (Mestrado), PPGG/UFRJ. 2016. 110p.
21. FONSECA, A. P. **Análise de mecanismos de escorregamento associados a voçorocamento em cabeceira de drenagem na Bacia do rio Bananal (SP/RJ)**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ. 2006. 348p.
22. FONSECA, A.P.; COELHO NETTO, A.L.; LACERDA, W.A. Evolução de Voçoroca e Escorregamentos de Terra em Cabeceiras de Drenagem na Concavidade Três Barras, Bananal - SP: um estudo na interface geomorfológica-geotécnica. In: **SINAGEO - VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**, UGB - União da Geomorfologia Brasileira, Goiânia, 2006.
23. FREIRE ALLEMÃO, A. V. **Recarga e drenagem em solos florestados: o papel dos sistemas radiculares**. Dissertação (mestrado) PPGG/IGEO/UFRJ. 1997. 136p.
24. HORTON, R. E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, 20(4), 693-711. 1939.
25. JANSEN, R. C. **Distribuição dos sistemas radiculares em encostas florestadas e sua influência sobre a infiltração**. Dissertação (mestrado) PPGG/IGEO/UFRJ. 2001. 118p.
26. KAZAY, D.F.; OLIVEIRA, L.A. **Avaliação da capacidade de infiltração e do pagamento por serviços ambientais em sistemas agroflorestais sucessionais: o caso da Cooperafloresta**. Monografia de Graduação - Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2014. 168 p.
27. LEAL, P. J. V. **Crescimento de redes de canais e pirataria de água subterrânea em vales de cabeceiras de drenagem: modelagem numérica tridimensional**. Tese (Doutorado), PPGG/ UFRJ. 2009. 246p.
28. LEAL, P. J. V.; COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. Desenvolvimento de redes de canais e pirataria de água subterrânea: bacia do rio do Bananal (RJ/SP). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 16(1), p. 107-122, 2015. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i1.321>.
29. LIMA, W. P; ZÁKIA, M. J. B.; LIBARDI, P. L.; SOUZA FILHO, A. P. Comparative evapotranspiration of Eucalyptus grandis, pine and natural “cerrado” vegetation measure by the soil water balance method. **IPEF Internacional**, v. 1, p. 5-11, 1990.
30. MARQUES, M.C.O ; COELHO NETTO, A.L ; SATO, A.M . Influência de floresta secundária e gramínea na deflagração de deslizamentos translacionais rasos em Nova Friburgo, Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, p. 793-806, 2018.

31. MELOS, A. R.; SATO, A. M.; COELHO NETTO, A. L. Produção, estoque e retenção hídrica da serrapilheira em encosta sob plantio de híbridos de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*: médio vale do rio Paraíba do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, 33(2), p. 66-73, 2010. DOI: https://doi.org/10.11137/2010_2_66-73.
32. MIRANDA, J.C. **Intercepção das chuvas pela vegetação florestal e serrapilheira nas encostas do Maciço da Tijuca: Parque Nacional da Tijuca, RJ**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geografia - PPGG, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 100p. 1992.
33. MONTEZUMA, R.C.M. **Produção e reabilitação funcional do piso florestal em clareira de deslizamento – Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geografia - PPGG, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 282p, 2005.
34. OUYANG, Y.; XU, D.; LEININGER, T. D.; ZHANG, N. A system dynamic model to estimate hydrological processes and water use in a eucalypt plantation. **Ecological Engineering**, 86, 290–299, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.008>.
35. PEVS/ IBGE. **Produção da extração vegetal e silvicultura**. IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Estatísticas Agropecuárias, Rio de Janeiro, v. 36, p. 1-8. 2022.
36. PICHLER, E. Boçorocas. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 2(1), p. 3-16, 1953.
37. RAM, J.; GARG, V. K.; TOKY, O. P.; MINHAS, P. S.; TOMAR, O. S.; DAGAR, J. C.; KAMRA, S. K. Biodrainage potential of *Eucalyptus tereticornis* for reclamation of shallow water table areas in north-west India. **Agroforestry systems**, v. 69, v. 2, p. 147-165, 2007.
38. REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the α -parameter using the Guelph permeameter. **Soil Science**, v.140, n° 4, p. 292–302, 1985.
39. ROCHA LEÃO, O. M. **Evolução regressiva da rede de canais por fluxos de água subterrânea em cabeceiras de drenagem: bases geo-hidroecológicas para a recuperação de áreas degradadas com controle de erosão**. Tese (Doutorado), PPGG/IGEO/UFRJ. 2005. 247p.
40. ROCHA-LEÃO, O. M.; LEAL, P.J.V.; COELHO NETTO, A.L. Expansão da rede de canais e a hidrologia subterrânea em cabeceiras de drenagem: mecanismos erosivos associados aos voçorocamentos em cabeceiras de drenagem no médio vale do Rio Paraíba do Sul. In: **XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, São Paulo. v. 1. p. 1709-1723, 2005.
41. RONQUIM, C. C.; COCHARSKI, T. C. D. Uso e ocupação do solo, Vale do Paraíba do Sul, 1985. **Embrapa Territorial- Outras publicações técnicas (INFOTECA-E)**, 2016a.
42. RONQUIM, C. C.; COCHARSKI, T. C. D. Uso e ocupação do solo, Vale do Paraíba do Sul, 2015. **Embrapa Territorial- Outras publicações técnicas (INFOTECA-E)**, 2016b.
43. ROSE, C. W.; YU, B.; WARD, D. P.; SAXTON, N. E.; OLLEY, J. M.; TEWS, E. K. The erosive growth of hillside gullies. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, p. 1989–2001, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3593>.
44. SATO, A. M. **Respostas geo-hidroecológicas à substituição de pastagens por plantações de eucalipto no médio vale do rio Paraíba do Sul: a interface biota-solo-água**. Dissertação (Mestrado), PPGG/UFRJ. 2008. 160p.
45. SATO, A. M. **Influência de plantios de eucalipto na hidrologia e erosão: bacia do rio Sesmária, médio vale do rio Paraíba do Sul**. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geografia/Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012. 178p.
46. SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. (2007). Hidrologia de encosta numa cabeceira de drenagem com cobertura de eucalipto na bacia do rio Sesmarias: médio vale do rio Paraíba do Sul. **Anais I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico**, Taubaté, Brasil, p. 07-09.
47. SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Spatial variability and temporal stability of throughfall in a eucalyptus plantation in the hilly lowlands of southeastern Brazil. **Hydrological Processes**, 25(12), 1910-1923, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7947>.
48. SCOTT, D. F.; LESCH, W. Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa. **Journal of Hydrology**, v. 199, n. 3-4, p. 360-377, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03336-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03336-7).
49. SHARDA, V. N.; SAMRAJ, P.; SAMRA, J. S.; LAKSHMANAN, V. Hydrological behaviour of first generation coppiced bluegum plantations in the Nilgiri sub-watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 211, p. 50–60, 1998.
50. SIDLE, R. C.; JARIHANI, B. KAKA, S. I.; KOC;I, J.; AI-SHAIBANI, A. Hydrogeomorphic processes affecting dryland gully erosion: Implications for modelling. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 43, n. 1, p. 46–64, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133318819403>.
51. SIKKA, A. K.; SAMRA, J. S.; SHARDA, V. N.; SAMRAJ, P.; LAKSHMANAN, V. Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiris watersheds of South India. **Journal of Hydrology**, v. 270, p. 12–26, 2003.

52. SILVA, A. S.; DA COSTA, G. C. P.; TÁVORA, G. S. G.; SELIGER, R. Influência do pisoteio do gado na alteração das propriedades físicas de horizontes superficiais em Santo Antônio de Pádua. *Geo UERJ*, v. 35, p. 1-19, 2019. DOI: 10.12957/geouerj.2019.46650.
53. SILVEIRA, C. S. **Infiltração e transporte de solutos na zona não saturada de um solo florestal – Parque Nacional da Tijuca, RJ.** COPPE/UFRJ. 2004. 217p.
54. SILVEIRA, C.S., BARBOSA, M.C., COELHO NETTO, A.L. A tracer experiment as an alternative methodology to understand infiltration pathway in a tropical rainforest soil." *Solos e Rochas*, v. 28(3): 261-270, 2005.
55. SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*, 253(1-4), p. 130-147, 2001. DOI:10.1016/S0022-1694(01)00477-2.
56. TÓTH, J. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology journal*, v. 7, n. 1, p. 1-14, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1007/s100400050176>.
57. VAN LILL, W. S.; KRUGER, F. J.; VAN WYK, D. B. The effect of afforestation with Eucalyptus grandis Hill ex Maiden and Pinus patula Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. *Journal of Hydrology*, v. 48, n. 1-2, p. 107-118, 1980.
58. VIANNA, L. G. G.; COELHO NETTO, A. L.; SATO, A. M. Expansion of eucalyptus in the Paraíba do Sul river valley: subsidies to the hydrological studies of basins. In: **2009 Latin American IALE Conference. Landscape Ecology in Latin America: challenges and perspectives**, Campos do Jordão - MG, p. 174-175, 2009.
59. VIANNA, L. G. G.; SATO, A. M.; FERNANDES, M. C.; COELHO NETTO, A. L. Fronteira de expansão dos plantios de eucalipto no geocossistema do médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). **Anais I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico**. Taubaté, Brasil, IPABHi, p. 367-369, 2007.
60. VILLAS BOAS, F.S. Nova metodologia para confecção e instalação de parcelas hidro-erosivas do tipo Gerlach. In: **XXVII Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural da UFRJ – CT e CCMN**, p. 285-286, 2005.
61. ZHANG, L.; DAWES, W; WALKER, G. R.; Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. CSIRO Land and Water, technical report 99/12. 1999.
62. ZHOU, G.Y.; MORRIS, J.D.; YAN, J.H.; YU, Z.Y.; PENG, S.L. Hydrological impacts of reafforestation with eucalypts and indigenous species: a case study in southern China. *Forest Ecology and Management*, v. 67 (1-3), p. 209-222, 2002.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.