

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS JERSZURKI

DINÂMICA HIDROGEOMORFOLÓGICA DE RAVINAS EM ESTRADAS NÃO
PAVIMENTADAS

CURITIBA

2021

LUCAS JERSZURKI

DINÂMICA HIDROGEOMORFOLÓGICA DE RAVINAS EM ESTRADAS NÃO
PAVIMENTADAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientação: Prof. Dr. Irani dos Santos

CURITIBA

2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Jerszurki, Lucas

Dinâmica hidrogeomorfológica de ravinas em estradas não pavimentadas /
Lucas Jerszurki. – Curitiba, 2021.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia.

Orientador: Irani dos Santos

1. Ravinas. 2. Erosão. 3. Geomorfologia. I. Universidade Federal do
Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Santos, Irani dos.
IV . Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIENCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA -
40001016035P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUCAS JERSZURKI** intitulada: **Dinâmica hidrogeomorfológica de ravinas em estradas não pavimentadas.**, sob orientação do Prof. Dr. IRANI DOS SANTOS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 03 de Março de 2021.

Assinatura Eletrônica
04/03/2021 16:41:23.0
IRANI DOS SANTOS
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
04/03/2021 16:33:44.0
JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - PROG. CIÊNCIA DO SOLO)

Assinatura Eletrônica
04/03/2021 17:10:23.0
GILSON BAUER SCHULTZ
Avaliador Interno Pós-Doc (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
12/03/2021 10:39:04.0
NELSON FERREIRA FERNANDES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO)

DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação à minha família, que me apoiou nos momentos difíceis e se alegrou comigo nas vitórias.

AGRADECIMENTOS

Elisiane e Davi.

Iara e Daniel.

Daniela.

Professor Doutor Irani dos Santos, por me receber como bolsista e me guiar na longa jornada da pós-graduação.

Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG) e todos os seus integrantes.

Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR), da UFPR.

LabESed (Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar), em especial a Daniel Peredes.

Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Universidade Federal do Paraná, que mesmo diante de tantos desafios à pesquisa e ao ensino, proporcionou os meios necessários para minha formação.

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de Mestrado.

RESUMO

As estradas não pavimentadas representam as maiores fontes de sedimentos transportados em zonas de floresta devido ao solo exposto, à compactação e às condições de conectividade. A erosão nas estradas pode se intensificar, gerando ravinas com a mescla de pequenos sulcos, caracterizando o aprofundamento da feição no solo juntamente com expansão longitudinal e lateral. Contudo, a dinâmica hidrogeomorfológica dessas feições erosivas sob eventos de precipitação ainda é pouco conhecida, pois poucos trabalhos empregaram monitoramento hidrossedimentológico em ravinas. Nessa perspectiva, teve-se por objetivo no presente trabalho avaliar as condições hidrogeomorfológicas determinantes da dinâmica erosiva em duas ravinas observadas em estradas não pavimentadas, localizadas em zonas de povoamento de *Pinus taeda* na bacia experimental do Rio Saci, município de Rio Negrinho/SC. A área de estudo foi mapeada com dados de um voo de RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), fornecendo Modelo Digital do Terreno (MDT) de alta resolução. As condicionantes hidrogeomorfológicas de declividade do terreno, área de contribuição, largura e profundidade das ravinas, condições de manejo e propriedades físicas do solo (coesão, granulometria e infiltração) foram analisadas. Vazão, produção de sedimentos e precipitação foram monitoradas nas ravinas durante 20 eventos de precipitação entre 2017 e 2019, sendo utilizadas calhas “H” associadas a sensores de nível, turbidímetros e pluviômetro. O modelo de erosão openLISEM, utilizado para a caracterização do comportamento erosivo das ravinas no tempo e no espaço, foi calibrado com dados da encosta analisada e bibliografia consultada. Os resultados foram avaliados com o uso do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). A Ravina com *Pinus* apresentou proporções inferiores (comprimento 191,4 m, volume 14,1 m³) quando comparada com a Ravina Lindeira (comprimento 214,3 m, volume 50,1 m³). A dinâmica hidrogeomorfológica das ravinas dependeu principalmente das variações de declividade do terreno, tamanho da área de contribuição, manejo e heterogeneidade espacial/comportamento erosivo dos diferentes perfis do solo, o que determina a morfometria das ravinas. A produção de sedimentos aumenta com o escoamento ($R^2 = 0,95$ e 0,66 para as Ravinas Lindeira e com *Pinus*, respectivamente). Destaca-se a relação entre a intensidade do escoamento e a intensidade da precipitação, a existência de depressões formadas pela erosão por queda d’água e o transporte não seletivo de sedimentos promovido pelo escoamento em sulcos. O modelo openLISEM reproduziu eficientemente o escoamento (coeficientes NSE variando entre -1,98 e 0,80), mas apresentou problemas na simulação da produção de sedimentos (coeficientes NSE variando entre -258,57 e 0,31) para a maioria dos eventos de chuva, superestimando os dados monitorados. Apesar disso, o modelo simulou a concentração dos processos erosivos no interior das ravinas, bem como representou as depressões como zonas de alternância de erosão e deposição e intensificação da infiltração. As depressões se mostraram áreas passíveis de modificações mais rápidas e intensas em relação ao restante das ravinas, representando importantes mecanismos de erosão no contexto de ravinas de estradas não pavimentadas.

Palavras-Chave: Erosão em Ravinas. Dinâmica Hidrogeomorfológica. Modelo OpenLISEM.

ABSTRACT

Unpaved roads represent the largest sources of sediment transported in forest areas due to exposed soil, compaction and connectivity conditions. Erosion on the roads can become more pronounced over time, generating ravines with a mixture of small grooves, characterizing the deepening of the feature in the soil along with longitudinal and lateral expansion without outcropping the water table. However, the hydrogeomorphological dynamics of these erosive features under precipitation events is still poorly understood, as few studies have used hydrosedimentological monitoring in ravines. In this perspective, the objective of this study was to evaluate the hydrogeomorphological conditions that determine erosive dynamics in two ravines observed on unpaved roads, located in areas of *Pinus taeda* in the experimental basin of the Saci River, municipality of Rio Negrinho, state of Santa Catarina. The study area was mapped with data from a RPA flight (Remotely Piloted Aircraft), providing high resolution Digital Terrain Model (MDT). The hydrogeomorphological conditions, slope of the land, contribution area, width and depth of the ravines, management conditions and physical properties of the soil (cohesion, granulometry and infiltration) were analyzed. Flow, sediment production and precipitation were monitored in the ravines during 20 precipitation events between 2017 and 2019, using "H" flume associated with level sensors, turbidimeters and rain gauge. The openLISEM model, used to characterize the erosive behavior of ravines in time and space, was calibrated with data from the analyzed slope and consulted bibliography. The results were evaluated using the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE). The *Pinus* Ravine showed lower proportions (length 191.4 m, volume 14.1 m³) when compared to the Ravine Lindeira (length 214.3 m, volume 50.1 m³). The hydrogeomorphological dynamics of the ravines depend on the variations in slope of the terrain, size of the contribution area, management, and spatial heterogeneity/erosive behavior of the different soil profiles, which determines the morphometry of the ravines. The production of sediments increases with increasing flow ($R^2 = 0.95$ and 0.66 for the Lindeira and *Pinus* ravines, respectively). The relationship between the intensity of runoff and the intensity of precipitation, the existence of depressions formed by erosion due to waterfalls and the non-selective transport of sediments promoted by runoff in furrows. The openLISEM model efficiently reproduced runoff (NSE coefficients ranging from -1.98 to 0.80) but presented problems in sediment production (NSE coefficients ranging from -258.57 to 0.31) for most rain events, overestimating the monitored data. Despite this, the model simulated the concentration of erosion processes inside the ravines, as well as representing the depressions as alternating zones of erosion and deposition and intensification of infiltration. The depressions proved to be areas subject to faster and more intense modifications in relation to the rest of the ravines, representing important erosion mechanisms in the context of ravines of unpaved roads.

Keywords: Ravine erosion. Hydrogeomorphological Dynamic. openLISEM.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS LINEARES POR DESCARGA ($m^3 s^{-1}$) E LARGURA DO CANAL (m), SENDO O TERMO “RILL” APLICADO ÀS FEIÇÕES MENORES, ENQUANTO “GULLY” É USADO PARA FEIÇÕES MAIORES.....	21
FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DAS RAVINAS (A) NA ESTRADA COM COBERTURA DE <i>PINUS</i> E (B) NA ESTRADA COM SOLO EXPOSTO, (C) E CARTOGRAAMA COM LOCALIZAÇÃO DAS RAVINAS NA BACIA, INSERIDA NA ZONA DE POVOAMENTO DE <i>PINUS</i> . AS ESTRADAS ADQUIREM RELEVÂNCIA PARA A BACIA PELA SUA GRANDE QUANTIDADE (OITO).	25
FIGURA 3 - (A) IMAGEAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO DA RAVINA COM <i>PINUS</i> , E (B) DRONE MODELO PHANTOM 3 UTILIZADO NO VÔO, COM CÂMERA ACOPLADA, FORNECIDO PELO LAPE-UFP <small>R</small> 27	
FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DE PARTÍCULAS DE SOLO PARA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA, ENSAIOS DE COESÃO, INFILTRAÇÃO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (S01 A S08)	29
FIGURA 5 - MEDAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO DAS RAVINAS: (A) TESTE DE PALHETAS OU <i>VANE TESTER</i> ; (B) GRANULÔMETRO MARCA <i>MICROTRAC</i> DISPONIBILIZADO PELO LAMIR-UFP <small>R</small> ; (C) ENSAIO DE INFILTRAÇÃO REALIZADO PELA EQUIPE DO LHG EM CAMPO E (D) TESTE DE PALHETAS REALIZADO NA ESTRADA DA RAVINA LINDEIRA	30
FIGURA 6 - COMPRIMENTO, LARGURA, PROFUNDIDADE E ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO DAS RAVINAS (A) COM <i>PINUS</i> E (B) LINDEIRA. AS MEDIÇÕES FORAM REALIZADAS A CADA UM METRO, E PARA O PERFIL LONGITUDINAL INICIARAM-SE NA PORÇÃO INICIAL DAS ESTRADAS	33
FIGURA 7 – DECLIVIDADE <i>VERSUS</i> PROFUNDIDADE PARA (A) RAVINA COM <i>PINUS</i> E (B) RAVINA LINDEIRA; ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO <i>VERSUS</i> PROFUNDIDADE PARA (C) RAVINA COM <i>PINUS</i> E (D) RAVINA LINDEIRA; DECLIVIDADE <i>VERSUS</i> LARGURA PARA (E) RAVINA COM <i>PINUS</i> E (F) RAVINA LINDEIRA; E ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO <i>VERSUS</i> LARGURA PARA (G) RAVINA COM <i>PINUS</i> E (H) RAVINA LINDEIRA	35
FIGURA 8 - PORÇÃO CENTRAL DA RAVINA COM <i>PINUS</i> , COM ALARGAMENTO DO CANAL OCASIONADO PELAS DEPRESSÕES. PEQUENOS ARBUSTOS SE DESENVOLVERAM NO INTERIOR DO CANAL EM MEIO AOS CONGLOMERADOS DE SOLO QUE DESABARAM DAS PAREDES	36

FIGURA 9 - DEPRESSÕES VERIFICADAS NA RAVINA LINDEIRA: (A) NA PORÇÃO SUPERIOR, COM APENAS UMA CAMADA DE SOLO VISÍVEL; E (B) NA PORÇÃO MÉDIA, COM UMA CAMADA DE SOLO SOBREJACENTE À CAMADA ARGILOSA MAIS RESISTENTE	37
FIGURA 10 - PERFIS TRANSVERSAIS DA RAVINA COM <i>PINUS</i> : (A, B) PORÇÕES SUPERIORES; E (C, D) PORÇÕES INFERIORES DA VERTENTE, INDICANDO VARIADOS FORMATOS COM PREDOMINÂNCIA DE PERFIS EM “V”. A POSIÇÃO DOS PERFIS NA RAVINA FOI INDICADA NA FIGURA 6A.	38
FIGURA 11 - PERFIS TRANSVERSAIS DA RAVINA LINDEIRA: (A, B) PORÇÕES SUPERIORES; E (C, D) PORÇÕES INFERIORES, ILUSTRANDO VARIADOS FORMATOS COM PREDOMINÂNCIA DE PERFIS EM “U”. A POSIÇÃO DOS PERFIS NA RAVINA FOI INDICADA NA FIGURA 6B...	39
FIGURA 12 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA REALIZADA EM GRANULÔMETRO A LASER PARA DIFERENTES PONTOS AMOSTRAIS: (A) RAVINA COM <i>PINUS</i> E (B) RAVINA LINDEIRA, COM DESTAQUE PARA AS GRANDES VARIAÇÕES DE GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS	41
FIGURA 13 - TRECHOS DA ESTRADA DA RAVINA LINDEIRA COM DESTAQUE PARA: (A) PEDESTAIS LOCALIZADOS NA SUPERFÍCIE E (B) FRAGMENTOS DE ROCHA DEPOSITADOS SOBRE O SOLO	42
FIGURA 14 – (A) OCORRÊNCIA DE CROSTA SUPERFICIAL EM SOLO EXPOSTO ADJACENTE AO CANAL DA RAVINA COM <i>PINUS</i> , COM DESABAMENTOS DO MATERIAL SUBJACENTE E RESQUÍCIOS DA CROSTA PROJETANDO-SE SOBRE O CANAL, E (B) DEPÓSITOS DE GRANDES AGLOMERADOS DE SEDIMENTOS PROVENIENTES DE DESABAMENTOS DE PAREDES NA RAVINA LINDEIRA, COM DESTAQUE PARA VEGETAÇÃO DE GRAMÍNEAS DESENVOLVIDA NA PORÇÃO ENTRESSULCOS.....	43
FIGURA 15 - OCORRÊNCIA DE RAVINAS (OR) EM RELAÇÃO AOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (VI), INDICANDO QUE QUANTO MAIOR VI, MENOR É OR	51
FIGURA 16 - HIDROGRAMA E SEDIMENTOGRAMA DE RAVINA MONITORADA, COM DECLÍNIO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E POSTERIOR RETOMADA (EM TORNO DE 2120 h), INDICANDO EXAUSTÃO NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	53
FIGURA 17 - CALHAS H ASSOCIADAS A SENsoRES DE NÍVEL (INSTALADOS NO INTERIOR DOS CANOS BRANCOS): (A) RAVINA COM <i>PINUS</i> ; (B) RAVINA LINDEIRA, E (C) ESQUEMA INDICANDO OS DETALHES CONSIDERADOS NO PROJETO DAS CALHAS H	55
FIGURA 18 - TURBIDÍMETROS INSTALADOS EM CAMPO NO INTERIOR DAS RAVINAS (A) COM <i>PINUS</i> E (B) LINDEIRA, CONECTADOS EM	

DATALOGGER MARCA WATERLOG, DISPOSTO EM UM POSTE FIXADO NAS PROXIMIDADES.....	57
FIGURA 19 - RESPOSTA DO SENSOR DE TURBIDEZ (<i>VOLTS</i>), MEDIDA COM USO DE DATALOGGER MARCA WATERLOG, VERSUS CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS OBTIDA ATRAVÉS DE EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO. A OBTENÇÃO DE DUAS EQUAÇÕES FOI NECESSÁRIA PARA MELHOR ADERÊNCIA À SÉRIE.....	58
FIGURA 20 – PLUVIÔMETRO DE BÁSCULA INSTALADO EM CAMPO SOBRE POSTE E PLATAFORMA. O SENSOR ESTÁ CONECTADO A UM DATALOGGER MARCA WATERLOG DISPOSTO NA PORÇÃO INFERIOR	59
FIGURA 21 - GRÁFICOS DE TODOS OS EVENTOS SELECIONADOS INDICANDO: (A) VAZÃO NA RAVINA COM <i>PINUS</i> , (B) PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA RAVINA COM <i>PINUS</i> , (C) VAZÃO NA RAVINA LINDEIRA, E (D) PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA RAVINA LINDEIRA	61
FIGURA 22 - ESCOAMENTO MONITORADO TOTAL VERSUS MAGNITUDE DE PRECIPITAÇÃO	62
FIGURA 23 - TEMPO ATÉ PRECIPITAÇÃO ANTECEDENTE VERSUS ESCOAMENTO TOTAL.....	63
FIGURA 24 - I ₁₀ E I ₃₀ MÁXIMAS VERSUS VAZÃO SUPERFICIAL MÁXIMA NOS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO MONITORADOS PARA: (A) RAVINA COM <i>PINUS</i> E (B) RAVINA LINDEIRA	64
FIGURA 25 - HIDROGRAMA DAS RAVINAS PARA O EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 20	65
FIGURA 26 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA VERSUS ESCOAMENTO ACUMULADO PROPORCIONADO PELO EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 20. OS MOMENTOS DE TRANSIÇÃO ENTRE AS TENDÊNCIAS ESTÃO INDICADOS POR SETAS	66
FIGURA 27 - HIDROGRAMA DAS RAVINAS PARA O EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 6	67
FIGURA 28 - HIDROGRAMA DAS RAVINAS PARA O EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 19	68
FIGURA 29 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA VERSUS ESCOAMENTO ACUMULADO PROPORCIONADO PELO EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 19, COM DESTAQUE PARA AS DUAS TENDÊNCIAS PRINCIPAIS DAS SÉRIES. A TRANSIÇÃO DA TENDÊNCIA DA SÉRIE É INDICADA POR UMA SETA PRETA FINA, ENQUANTO PORÇÕES ONDE OCORRE AUMENTO DE	

PRECIPITAÇÃO SEM AUMENTO DE ESCOAMENTO SÃO INDICADAS POR SETAS PRETAS LARGAS.....	69
FIGURA 30. ESCOAMENTO SUPERFICIAL <i>VERSUS</i> PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS TOTAL	70
FIGURA 31 - TEMPO ATÉ PRECIPITAÇÃO ANTECEDENTE <i>VERSUS</i> PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS TOTAL PARA OS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO MONITORADOS. NÃO FOI IDENTIFICADA RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS	71
FIGURA 32 – (A) SEDIMENTOGRAMA DAS RAVINAS E (B) PRECIPITAÇÃO ACUMULADA <i>VERSUS</i> PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS ACUMULADA PARA O EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 20	72
FIGURA 33 – (A) AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS DE SOLO DEPOSITADOS NO FUNDO DO CANAL DA RAVINA E (B) DEPRESSÃO COM ARMAZENAMENTO DE ÁGUA E SEDIMENTOS NA RAVINA LINDEIRA. AS DEPRESSÕES ARMAZENAM ÁGUA E SEDIMENTOS QUE PODEM SER TRANSPORTADOS EM EVENTOS POSTERIORES	76
FIGURA 34 – ÁRVORES DE <i>PINUS</i> SENDO GRADATIVAMENTE “ENGOLIDAS” PELA EXPANSÃO DA LARGURA DA RAVINA	77
FIGURA 35 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DO MODELO OPENLISEM, COM AS PRINCIPAIS ENTRADAS E SAÍDAS INDICADAS PELAS FLECHAS FINAS, ENQUANTO OS FLUXOS DE ENERGIA E CONEXÕES SÃO INDICADOS POR FLECHAS LARGAS	82
FIGURA 36 - MODELOS DIGITAIS DO TERRENO REPRESENTADOS NO PCRASTER PARA A ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (A) DA RAVINA COM <i>PINUS</i> E (B) RAVINA LINDEIRA, COM AS PORÇÕES MAIS ALTAS DO TERRENO NO LADO DIREITO DE CADA IMAGEM.....	85
FIGURA 37 – HIDROGRAMAS E SEDIMENTOGRAMAS DOS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO (A, B, C, D) 6, (E, F) 9, (G,H,I,J) 20, (K,M,S) 19, (L,N) 17, (O,Q) 16 E (P,R) 10, PARA A RAVINA COM <i>PINUS</i> (RP) E PARA A RAVINA LINDEIRA (RL).....	91
FIGURA 38 - ESCOAMENTO DISTRIBUÍDO PARA A RAVINA COM <i>PINUS</i> NO EVENTO 6. O ESCOAMENTO SIMULADO CONCENTROU-SE NO INTERIOR DA RAVINA (0,68 mm), CORROBORANDO OS RESULTADOS OBSERVADOS NO MONITORAMENTO	95
FIGURA 39 - INFILTRAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA A RAVINA COM <i>PINUS</i> NO EVENTO 6. A INFILTRAÇÃO FOI MAIOR NO INTERIOR DA RAVINA (ATINGINDO 6,09 mm).....	96

FIGURA 40 – ESCOAMENTO DISTRIBUÍDO PARA A RAVINA LINDEIRA NO EVENTO 6. O ESCOAMENTO CONCENTROU-SE NO INTERIOR DA RAVINA, TANTO NO CANAL PRINCIPAL QUANTO NOS CANAIS LATERAIS.....	97
FIGURA 41 - INFILTRAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA A RAVINA LINDEIRA NO EVENTO 6. A INFILTRAÇÃO CONCENTROU-SE NO INTERIOR DA RAVINA E NOS BARRANCOS LATERAIS. ALGUNS TRECHOS DA RAVINA APRESENTARAM INFILTRAÇÃO REDUZIDA, PRINCIPALMENTE NAS PORÇÕES SEM DEPRESSÕES.....	98
FIGURA 42 - INFILTRAÇÃO DISTRIBUÍDA AO LONGO DA RAVINA COM <i>PINUS</i> PARA O EVENTO 9, COM DESTAQUE NA INFILTRAÇÃO DAS DEPRESSÕES (FLECHAS MENORES), O QUE NÃO FOI OBSERVADO NO ESCOAMENTO DO EVENTO 6	99
FIGURA 43 - EROSÃO E DEPOSIÇÃO DISTRIBUÍDA AO LONGO DA RAVINA COM <i>PINUS</i> PARA O EVENTO 17. AS DEPRESSÕES IMPÔEM REGIME DE ALTERNÂNCIA ENTRE EROSÃO E DEPOSIÇÃO NO INTERIOR DA RAVINA	101
FIGURA 44 - EROSÃO E DEPOSIÇÃO DISTRIBUÍDA AO LONGO DA RAVINA LINDEIRA PARA O EVENTO 20. OCORreu ALTERNÂNCIA ENTRE EROSÃO E DEPOSIÇÃO NO INTERIOR DA RAVINA, ONDE OS PROCESSOS EROSIVOS FORAM MAIS INTENSOS.	102
FIGURA 45 - SOBREPOSIÇÃO DE RESULTADO DISTRIBUÍDO DE: (A) PERDA DE SOLO NA RAVINA COM <i>PINUS</i> PARA O EVENTO 20 JUNTAMENTE COM CURVAS DE NÍVEL COM EQUIDISTÂNCIA DE 0,1 M; E (B) PERDA DE SOLO NA RAVINA LINDEIRA PARA O EVENTO 20 JUNTAMENTE COM CURVAS DE NÍVEL COM EQUIDISTÂNCIA DE 0,3 M. A FIGURA INDICA A INTENSIFICAÇÃO DA EROSÃO NA ENTRADA DA DEPRESSÃO E A REDUÇÃO DA EROSÃO À JUSANTE.....	103
FIGURA 46 - RAVINA COM <i>PINUS</i> ONDE OBSERVA-SE (A) A PRESENÇA DE ACÍCULAS NO INTERIOR DA CALHA H, COM DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS EM SUAS IMEDIAÇÕES; (B) SOLO COBERTO COM ACÍCULAS NA SUPERFÍCIE DA ESTRADA AO REDOR DA RAVINA; (C) AMONTOADO DE ACÍCULAS EM UM ESTREITAMENTO DA RAVINA COM <i>PINUS</i> ; E (D) CALHA H DA RAVINA LINDEIRA ENTUPIDA	106

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ÁREAS (m ²), COMPRIMENTOS (m), VOLUMES (m ³), LARGURAS (m) E PROFUNDIDADES (m) DAS RAVINAS COM PINUS E LINDEIRA E RESPECTIVAS ESTRADAS AVALIADAS.....	32
TABELA 2 - VALORES DE COESÃO OBTIDOS COM TESTE DE PALHETAS, INFILTRAÇÃO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO MEDIDAS COM INFILTRÔMETRO DE TENSÃO PARA OS PONTOS AMOSTRADOS AO LONGO DAS RAVINAS.....	40
TABELA 3 - EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO SELECIONADOS: MAGNITUDES E RESPECTIVOS I10 E I30, ESCOAMENTO SUPERFICIAL TOTAL (E), VAZÃO MÁXIMA (Q _p), PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS TOTAL (Q _{st}) E PICO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (Q _{sp}).....	60
TABELA 4 - PRECIPITAÇÃO (mm), DATA, INTENSIDADES I10 E I30 (mm h ⁻¹), ESCOAMENTO (mm), PICO DE ESCOAMENTO (L s ⁻¹), PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (kg) E PICO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (g s ⁻¹) DOS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO SELECIONADOS PARA AS SIMULAÇÕES NO OPENLISEM DAS RAVINAS COM PINUS E LINDEIRA.....	84
TABELA 5 - PARÂMETROS DE ENTRADA DEFINIDOS PARA O MODELO OPENLISEM APLICADO NAS RAVINAS COM PINUS E LINDEIRA. OBSERVA-SE QUE OS VALORES FORAM DIFERENTES ENTRE OS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO, DEVIDO À AUSÊNCIA DE CALIBRAÇÃO QUE CONTEMPHASSE TODOS OS RESULTADOS MONITORADOS.....	86
TABELA 6 – RESULTADOS MONITORADOS (M) E SIMULADOS (S) TOTAIS DE ESCOAMENTO TOTAL (E _t), VAZÃO MÁXIMA (Q _p), PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (Q _{st}), PICO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (Q _{sp}), EROSÃO POR SPLASH (Q _{splash}) E EROSÃO POR ESCOAMENTO (Q _{escoamento}) PARA CADA EVENTO DE PRECIPITAÇÃO.....	88
TABELA 7 – COEFICIENTES NSE OBTIDOS ENTRE AS SÉRIES MONITORADA E SIMULADA DE VAZÃO E DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PARA CADA EVENTO DE PRECIPITAÇÃO NAS RAVINAS COM PINUS E LINDEIRA.....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	GERAL	17
2.2	ESPECÍFICOS	17
3	JUSTIFICATIVA	18
4	CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO DE RAVINAS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	20
4.1	INTRODUÇÃO	20
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.3	RESULTADOS.....	31
4.4	DISCUSSÃO	43
4.5	CONCLUSÕES	48
5	MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO DE RAVINAS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	49
5.1	INTRODUÇÃO	49
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS	54
5.3	RESULTADOS.....	59
5.4	DISCUSSÃO	72
5.5	CONCLUSÕES	78
6	SIMULAÇÃO DA DINÂMICA EROSIVA DE RAVINAS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	79
6.1	INTRODUÇÃO	79
6.2	MATERIAIS E MÉTODOS	84
6.3	RESULTADOS.....	87
6.4	DISCUSSÃO	104
6.5	CONCLUSÕES	109
7	CONCLUSÕES GERAIS.....	110
	REFERÊNCIAS	112

1. INTRODUÇÃO GERAL

Os processos erosivos se intensificam com o tempo principalmente devido ao manejo inadequado da área ou solo exposto, característica das estradas não pavimentadas (ZOCCAL, 2007; VITTE; MELLO, 2007; SCHULTZ, 2013). A erosão dos solos é um problema grave no Brasil, ocasionando anualmente a perda de milhões de reais devido aos prejuízos relacionados (TELLES; GUIMARÃES; DECHEN, 2011).

A intensificação da erosão produz resultados na própria encosta ou à jusante, como assoreamento dos rios e degradação ambiental (MACHADO et al., 2003), dependendo das condições de conectividade hidrossedimentológica, a qual condiciona a entrega de sedimentos produzidos na bacia hidrográfica analisada (WALLING, 1983; SCHULTZ, 2017; MORGAN, 2005).

A precipitação atinge o solo gerando erosão pelo impacto da gota, o que depende das condições da superfície (ELLISON, 1945; FERNÁNDEZ-RAGA et al., 2017). A água que não infiltra no solo forma poças na superfície (HORTON, 1933), que se conectam durante o evento de precipitação. A concentração do escoamento devido às condições topográficas do terreno ocasiona a erosão linear. O movimento de partículas pelo escoamento é gerado por meio da ação da tensão de cisalhamento do escoamento no solo, inicialmente proposta por Shields (1936) para sedimentos não coesivos. A erosão linear produz pequenos sulcos que podem evoluir para ravinas ao longo da vertente (MARTINS et al., 2017).

O termo ravina denomina feições erosivas que podem ser eliminadas com agricultura convencional. Estudos indicam a ausência de afloramento do nível freático como forma de diferenciação entre ravinas e voçorocas (GUERRA, 1997), além do tamanho (IMESON; KWAAD, 1980), expressando resultados de um mesmo processo erosivo que se intensifica (NACHTERGAELE et al., 2002). As ravinas alteram as condições naturais de erosão, intensificando a perda de solo (VANWALLEGHEM et al., 2005).

Para quantificar a magnitude erosiva das ravinas, utilizam-se modelos preditivos (HOWARD, 1999), por meio de simulação de escoamento e erosão sob eventos de precipitação sobre bacias hidrográficas, informações que podem servir de base para avaliações quanto a dinâmica hidrossedimentológica (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996).

A incerteza da modelagem de ravinas ainda se concentra na lacuna acerca da distribuição espacial e temporal da erosão. De forma geral, é dada pouca atenção às condicionantes hidrogeomorfológicas e aos padrões de erosão e deposição nas feições lineares

(MARZOLFF; POESEN, 2009), o que pode distorcer a reprodutibilidade dos mecanismos atuantes (SIDORCHUK, 2005).

As condicionantes hidrogeomorfológicas são as determinantes do comportamento da erosão hídrica no espaço-tempo, sendo a hidrogeomorfologia o estudo da relação entre as formas do relevo e a água (SCHEIDECKER, 1973), representando a união entre geomorfologia e hidrologia (GOERL; KOBIYAMA; SANTOS, 2012). Para Sidle e Onda (2004), hidrogeomorfologia pode ser conceituada como:

Uma ciência interdisciplinar que se concentra na interação e ligação de processos hidrológicos com formas de relevo ou materiais terrestres e a interação de processos geomórficos com água superficial e subterrânea em dimensões espaciais (SIDLE; ONDA, 2004, p.598).

A análise hidrogeomorfológica leva em consideração a energia e a dinâmica do fluxo da água agindo sobre uma condição geomorfológica de determinado ambiente, promovendo erosão (BRINSON, 1993; SHAFFER; YOZZO, 1998; MARINI; PICOLLO, 2005).

Já é conhecido que a formação de ravinamentos é influenciada por fatores hidrogeomorfológicos como declividade, forma e tamanho da vertente, além de propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo. A ação antrópica também exerce influência direta sobre o processo de ravinamento (VANWALLEGHEM et al., 2005), como nos desmatamentos, incêndios, manejo incorreto do solo e construção de estradas (MARTINS et al., 2017).

A relação entre estradas não pavimentadas em zonas florestais e a formação de feições erosivas lineares já foi estudada em outros trabalhos (BURROUGHS; KING, 1989; MOEYERSONS, 1991; MONTGOMERY, 1994; CROKE; MOCKLER, 2001; CAVICHIOLI, 2005; HEEDE, 1975; OLIVEIRA et al., 2015; POESEN, 2011; SIDLE; ZIEGLER, 2012; DOUGLAS et al., 2015), indicando que dependendo da localização da estrada na vertente, a drenagem da via contribui para o declive, concentrando escoamento e promovendo erosão em sulcos. A perda de solo promovida nas estradas pode representar altos percentuais da perda de solo da bacia hidrográfica (CORRÊA; DEDECECK, 2009).

Em zonas florestais de povoamento de *Pinus*, as estradas adquirem relevância principalmente devido à sua alta densidade (km km^{-2}) em meio às árvores, condição imposta pelo método utilizado na extração dos troncos na época do corte. A quantificação da produção, transporte e deposição de sedimentos nessas áreas é importante, pois a erosão interfere na dinâmica hidrogeomorfológica das encostas (MACHADO et al., 2003; SCHULTZ, 2013).

Bacias hidrográficas que apresentam manejo do solo com predominância de florestas plantadas, como a bacia hidrográfica experimental do Rio Saci, localizada em Rio

Negrinho/SC, apresentam intensa ocorrência de ravinas associadas à densa rede de estradas não pavimentadas. Entretanto, estudos analisando a erosão por ravinamento sobre o modelado do relevo nessas condições são escassos.

Considerando a intensificação dos processos erosivos que culminam em ravinas nas estradas de florestas plantadas, o problema da pesquisa alude às condições hidrogeomorfológicas que determinam a dinâmica erosiva em ravinas no contexto de estradas não pavimentadas.

Assim, a hipótese é de que os eventos de precipitação determinam a evolução das ravinas, dependendo dos atributos físico-hídricos do solo e da geomorfologia em escala de vertente.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Identificar as principais condicionantes hidrogeomorfológicas da dinâmica erosiva em ravinas vinculadas a duas estradas não pavimentadas, localizadas em zonas de povoamento de *Pinus taeda* na bacia experimental do rio Saci, no município de Rio Negrinho/SC.

2.2. ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos podem ser descritos por:

- Determinar a morfometria e as propriedades físicas do solo das ravinas utilizando imageamento com RPA, geoprocessamento e mensurações de parâmetros em campo;
- Identificar a dinâmica hidrogeomorfológica das ravinas sob eventos pluviométricos, por meio da avaliação da geração de escoamento e produção de sedimentos;
- Compreender os mecanismos específicos atuantes na dinâmica hidrogeomorfológica das ravinas com o modelo openLISEM 6.41.

3. JUSTIFICATIVA

A quantificação do deflúvio nas estradas não pavimentadas destinadas à extração de troncos precisa ser melhor estudada, buscando dimensionar os impactos nas encostas afetadas

(WEMPLE et al., 1996), o que envolve a conectividade hidrossedimentológica com os cursos d'água à jusante e transporte de sedimentos (SIDLE et al., 2004; DOUGLAS et al., 2015). As estradas intensificam a erosão formando ravinas, potencializando problemas como o assoreamento de rios, perda de produtividade agrícola e desastres ambientais (SIDLE; ZIEGLER, 2012).

O monitoramento de eventos de precipitação que geram escoamento e produção de sedimentos em feições erosivas do tipo ravina foi estudado em poucos trabalhos, geralmente utilizando técnicas de baixa resolução temporal, como a coleta de amostras de água em intervalos fixos de tempo (PIEST; BRADFORD; SPOMER, 1975; RODZIK, 2009).

A análise da erosão baseando-se em eventos de precipitação é necessária e cada vez mais presente em modelos como LISEM, permitindo o aprofundamento e compreensão da dinâmica hidrogeomorfológica e possibilitando a análise de processos complexos (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996; OOSTWOUW WIJDENES; BRYAN, 2001). Além disso, ravinas podem ser formadas ou expandidas em apenas um evento chuvoso intenso (NACHTERGAELE; POESEN, 2002), o que ressalta a importância das reduzidas escalas de tempo.

LAWLER (1991) considera que metodologias não automatizadas dificultam o monitoramento em áreas isoladas ou por longos períodos. Desta forma, o desenvolvimento de tecnologias para a obtenção de séries de deflúvio e erosão em campo possibilita o aumento da resolução temporal e melhora consideravelmente o monitoramento da produção de sedimentos.

Estudos quantitativos em ravinas devem utilizar metodologias que melhor expressem as magnitudes de sedimentos transportados para definição dos processos erosivos envolvidos (HEEDE, 1975). Na literatura encontram-se modelos que estimam a erosão em ravinas (HOWARD, 1999), contudo, esses modelos não são validados para previsão de impactos de mudanças ambientais sobre produção de sedimentos e dinâmicas hidrológicas (POESEN, 2003), ou mesmo não possuem resoluções espacial e temporal necessárias para isso.

Os modelos preditivos voltados ao estudo da erosão fornecem projeções sobre sedimentação e bases científicas para análises dos processos envolvidos (HOWARD, 1994; MACHADO et al., 2003). Os modelos hidrológicos possibilitam a caracterização dos processos relacionados ao escoamento superficial, fornecendo subsídios para a compreensão dos eventos e suas consequências (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996; COULTHARD et al., 2012), uma vez que um dos grandes objetivos das análises hidrossedimentológicas consiste em

determinar a relação entre processos hidrológicos e sedimentológicos (TUCCI, 2001; SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

4. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO DE RAVINAS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

4.1. INTRODUÇÃO

Nos estudos hidrogeomorfológicos, a precipitação é uma das condicionantes mais importantes, pois atua diretamente na erosão hídrica, o que depende de sua duração, intensidade e frequência (WISCHMEIER; SMITH, 1958; WISCHMEIER, 1959). A erosão inicia-se com o impacto da gota de água que caracteriza o efeito *splash* no solo, podendo seguir por dois caminhos distintos: infiltrar ou escoar superficialmente. O escoamento ocorre devido à reduzida capacidade de infiltração da superfície e/ou por saturação do solo, com a elevação do nível freático (HORTON, 1933; ELLISON, 1945; DUNNE; BLACK, 1970; FERNÁNDEZ-RAGA et al., 2017).

O escoamento superficial pode ser laminar, raso e uniforme, ou linear e concentrado (WISCHMEIER; SMITH, 1958). O escoamento concentrado proporciona a erosão linear, cujo ritmo de avanço é variável, dependendo do estágio de desenvolvimento de algum tipo de feição erosiva no local e das condicionantes hidrogeomorfológicas do meio. Uma rede de pequenos sulcos tende a transportar grande quantidade de sedimentos, o que configura um processo rápido de degradação do solo. O desenvolvimento avançado da erosão caracteriza a ravina, que pode atingir o nível freático e promover a formação da seção em “U”, configurando o aparecimento de voçoroca quando atingir maiores proporções (SANTOS et al., 2002; VITTE; MELO, 2007; LAFAYETTE; CANTALICE; COUTINHO, 2011).

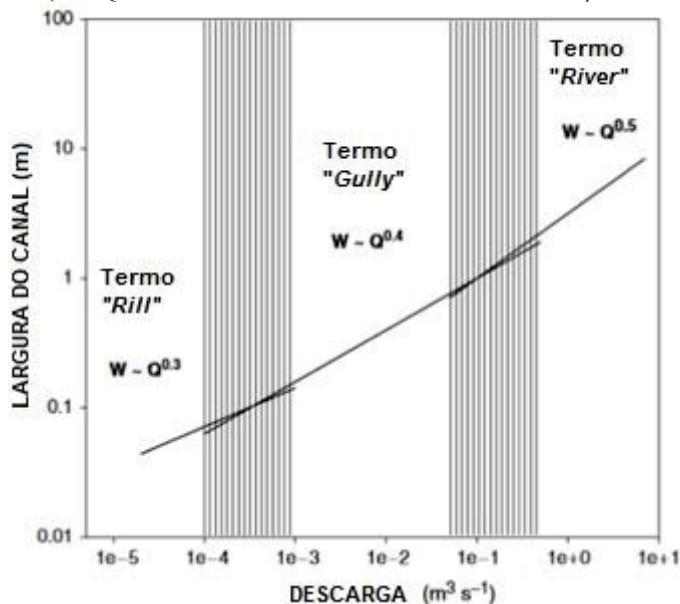
Não há consenso estabelecido sobre as principais diferenças entre ravinas e voçorocas. O termo ravina surgiu para caracterizar pequenos sulcos que poderiam ser eliminados com procedimentos de aragem da terra (GUERRA, 1997). A voçoroca é maior que a ravina, com largura e profundidade superiores a 0,5 m, contudo, os valores são arbitrários (IMESON; KWAAD, 1980). A definição sugerida pelo Instituto Técnico Paulista considera que há necessidade da presença de afloramento do nível freático nas voçorocas, promovendo juntamente com o escoamento superficial a erosão remontante e linear. Ravinas, por outro lado, seriam feições erosivas lineares sem afloramento do nível freático. Essa foi a classificação adotada no presente trabalho (OLIVEIRA, 2007, p.59).

Estudos internacionais indicam denominações diferenciadas para as feições erosivas lineares, em que o termo “*gully*” é aplicado a todas as ocorrências. O termo “*ephemeral gully*”

é utilizado para os sulcos corrigidos com práticas agrícolas, com menos de 0,5 metros de profundidade. O termo “*classic gully*” refere-se aos sulcos com mais de 0,5 metros de profundidade, com fluxos intermitentes e sem possibilidade de correção por equipamentos agrícolas comuns (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008, 9.19-20; BENNETT; WELLS, 2019).

As principais diferenças entre as classificações de feições erosivas lineares podem ser observadas na FIGURA 1, obtida de estudo considerando sua formação em áreas agrícolas (NACHTERGAELE *et al.*, 2002). Na validação da equação de regressão indicada na FIGURA 1, os ambientes analisados apresentaram solos relativamente homogêneos na maioria dos casos. Para ravinas que encontram camadas internas de solo mais resistentes à erosão, podendo provocar alargamento excessivo da feição, a relação deixa de ser válida.

FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES EROSIVAS LINEARES POR DESCARGA ($m^3 s^{-1}$) E LARGURA DO CANAL (m), SENDO O TERMO “RILL” APLICADO ÀS FEIÇÕES MENORES, ENQUANTO “GULLY” É USADO PARA FEIÇÕES MAIORES



FONTE: NACHTERGAELE *et al.* (2002).

Feições com pequena largura e valores reduzidos de vazão são denominadas *rills* ou sulcos. Conforme os valores de vazão e largura vão aumentando, as feições passam a se chamar *gully* e posteriormente *river*, já consideradas rios. Entre os domínios, existem extensas faixas de transição, em que não há consenso a respeito das terminologias utilizadas (NACHTERGAELE *et al.*, 2002).

As classificações surgem para caracterizar fases de um único processo. As feições erosivas lineares possuem um processo evolutivo que ocorre com a intensificação da erosão do sulco inicial, desenvolvendo-se a expansão lateral e longitudinal, podendo adquirir a

estabilização devida à angulação de paredes e presença de vegetação no seu interior, ou continuar se expandindo até o alcance do nível freático, quando a erosão se intensifica ainda mais (NACHTERGAELE; POESEN, 2002; DESTA; ADUGNA, 2012).

A presença de ravinhas está associada ao manejo do solo, com práticas relacionadas ao desmatamento, à remoção das camadas superficiais e à ocupação territorial desordenada. Modificações no ritmo dos processos naturais são decorrentes de ações humanas, como é o caso da agricultura e construção de estradas, principalmente as não pavimentadas que se destinam à retirada de troncos em zonas de plantio de árvores (SIDLE *et al.*, 2004; ZIEGLER *et al.*, 2006; LAFAYETTE *et al.*, 2005; CAMPOS *et al.*, 2006; POESEN, 2011; FRANCISCO, 2011).

A cobertura vegetal auxilia na redução da erosão ocasionada pela chuva (KITTREDGE, 1948, p.279; ABRAHAMS; PARSONS; WAINWRIGHT, 1995; ZIEGLER; SUTHERLAND; GIAMBELLUCA, 2001), pois protege o solo contra o impacto das gotas e reduz o escoamento superficial, diminuindo a ocorrência das ravinhas ou mesmo restringindo o aumento de suas proporções (FERREIRA *et al.*, 2014). Além disso, a vegetação melhora a infiltração através das raízes das plantas e promove a transpiração (KITTREDGE, 1948, p.215-229), diminuindo a quantidade de água que contribui para o escoamento superficial (CHUQUIPIONDO, 2007).

Em zonas de povoamento de *Pinus*, ocorre significativa redução do escoamento e aumento da interceptação empreendidos nas zonas vegetadas. Devido às condições economicamente viáveis de plantio das árvores destinadas à extração, a quantidade de vias de acesso é necessariamente maior, para facilitar o acesso de máquinas pesadas, gerando mudanças mais severas na vertente original (BALBINO *et al.*, 2011; FERREIRA *et al.*, 2014). As estradas são as principais causas de erosão das encostas e assoreamento de rios em zonas florestais (MEGAHAN; KIDD, 1972; GARCIA *et al.*, 2003; FRANCISCO, 2011).

A erosão hídrica é facilitada nas estradas não pavimentadas, devido à compactação e à impermeabilização pelo tráfego de veículos, gerando diminuição da infiltração e aumento do escoamento (REID; DUNNE, 1984). Cada estrada apresenta aspectos específicos, mas em geral seus índices de erodibilidade são mais elevados em relação às áreas agricultáveis (MEGAHAN; KIDD, 1972; OLIVEIRA *et al.*, 2009). A idade e as condições de uso e manutenção da estrada determinam a disponibilidade e o tamanho das partículas erodidas e transportadas (CASTILLO *et al.*, 2003; SHEIKH *et al.*, 2010; THOMAZ; PEREIRA, 2013).

A ocorrência de ravinhas está diretamente associada à quantidade de estradas construídas (BALBINO *et al.*, 2011; FERREIRA *et al.*, 2014). O solo exposto das estradas pode

ser facilmente erodido com a chuva devido ao escoamento concentrado (SIDLE; ZIEGLER, 2012), principalmente com a ausência de manutenção nas estradas, inexistência de estruturas de drenagem ou ausência de adoção de medidas conservacionistas (NYSSEN *et al.*, 2002; VALENTIN; POESEN; LI, 2005).

O desmatamento e o solo exposto são fatores muito importantes para o aparecimento de ravinas em estradas, pois tanto o efeito *splash* quanto o escoamento superficial são alterados significativamente (WEMPLE; SWANSON; JONES, 2001; DEMARCHI *et al.*, 2003; SCHULTZ, 2013). O número de feições erosivas lineares e os respectivos volumes são proporcionais ao comprimento das estradas, enquanto o elevado número de ravinas está diretamente associado ao volume erodido de sedimentos nas estradas (KING, 1979).

Outros fatores relacionados à geomorfologia da vertente também são importantes para a erosão, com destaque para declividade local, forma da vertente (LUCE; BLACK, 1999; NYSSEN *et al.*, 2002; VALENTIN; POESEN; LI, 2005) e área de drenagem (PATTON; SCHUMM, 1975; CASALÍ; LOPÉZ; GIRÁLDEZ, 1999).

Luce e Black (1999) monitoraram segmentos de estradas não pavimentadas no Oregon, nos EUA, e verificaram que incrementos no comprimento ou na declividade dos segmentos estavam relacionados com aumento da erosão. Também foi observada uma forte relação entre incrementos no tamanho dos sedimentos e diminuição da erosão, uma vez que partículas maiores são menos propensas ao transporte do que partículas finas.

Nyssem *et al.* (2002) indicaram, a partir de seus resultados de mapeamento de erosão de estradas na Etiópia, que o gradiente crítico de declividade para formação de feições erosivas lineares diminui com a presença de estradas na bacia hidrográfica. Assim, é mais fácil desenvolverem-se essas feições em ambientes com estradas, considerando uma mesma área de drenagem.

O resultado da combinação de condicionantes hidrogeomorfológicas pode ser observado na análise espacial das ravinas. Alguns estudos utilizaram inventários baseados na aplicação de imagens de satélite, cartas topográficas ou fotos aéreas, calculando-se porcentagens de área ocupada por feições observadas em locais delimitados, associadas à consideração de características do meio ambiente (VANDAELE *et al.*, 1996; OOSTWOUD WIJDENES *et al.*, 2000; EVANS, 2010; FERREIRA *et al.*, 2014; KARYDAS; PANAGOS, 2020). Contudo, pequenas ravinas não aparecem nessas fontes de dados com resolução reduzida. Por isso, a utilização de modelos digitais do terreno (MDTs) com alta resolução

espacial tem ganhado destaque nas pesquisas envolvendo erosão por ravinamento (HANCOCK *et al.*, 2012).

A análise espacial das ravinas via MDT pode ser feita com a utilização de RPAs (*Remotely Piloted Aircraft*), comumente denominados drones, os quais são utilizados em diferentes áreas (CAROLLO *et al.*, 2015). Suas aplicações vêm se intensificando nos últimos tempos, principalmente com a redução de custos, tamanho dos equipamentos e otimização dos recursos disponíveis (JORGE; INAMASU, 2014; PAZ; SAMPAIO, 2019). A identificação e avaliação de feições erosivas é uma das possibilidades de uso dos RPAs (LUZ; ANTUNES, 2015).

A utilização de dados provenientes de RPAs para o cálculo de volume de ravinas pode oferecer resultados com diferentes níveis de confiança, conforme o grau de sobreposição das imagens e condições de oclusão de pontos, o que varia com a altura de voo (CUNHA; ALIXANDRINIJR; FERNANDES, 2018). Os RPAs favorecem a análise detalhada, devido à alta resolução espacial que apresentam, mesmo com os fatores que podem alterar a qualidade das imagens, como a presença de vegetação e sombras dos objetos imageados (HUNG *et al.*, 2018).

A caracterização morfométrica de feições erosivas do tipo ravina é bem abordada na literatura, tendo muitos trabalhos com observações, medições em campo e modelagens de diversos tipos (TAKKEN *et al.*, 1999; HOWARD, 1999; ZIEGLER *et al.*, 2006; THOMAZ, 2012). Por outro lado, a utilização de imageamentos de alta precisão, como os produzidos por RPA na caracterização de ravinas, e a realização de estudos com a técnica podem indicar uma alternativa interessante aos métodos convencionais de imageamento.

Para zonas de povoamento de *Pinus*, como a bacia hidrográfica experimental do Rio Saci, o imageamento de alta precisão pode auxiliar na identificação da morfologia de feições erosivas do tipo ravina de pequenas proporções, possibilitando a avaliação dos parâmetros morfométricos e da dinâmica hidrogeomorfológica dessas estruturas.

Considerando os aspectos sobre ravinas e os meios para sua caracterização, teve-se por objetivo no presente capítulo caracterizar a morfometria, as propriedades físicas e de superfície do solo das ravinas verificadas em duas estradas rurais não pavimentadas, localizadas em zonas de povoamento de *Pinus taeda*, no município de Rio Negrinho/SC, utilizando imageamento com RPA, geoprocessamento e mensurações de parâmetros em campo.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Rio Saci, que tem área 0,18 km² e está inserida no Alto Rio Negro, no município de Rio Negrinho/SC, próximo à divisa com o Estado do Paraná, disposto entre o Primeiro Planalto e o Planalto de Canoinhas, com altitude média de 960 metros (SANTOS, 2009). A classificação de Köppen para o clima regional é Cfb, temperado úmido sem estação seca, com média das temperaturas máximas inferior a 22°C, e chuvas anuais em torno de 1500 mm (THOMÉ *et al.*, 1999).

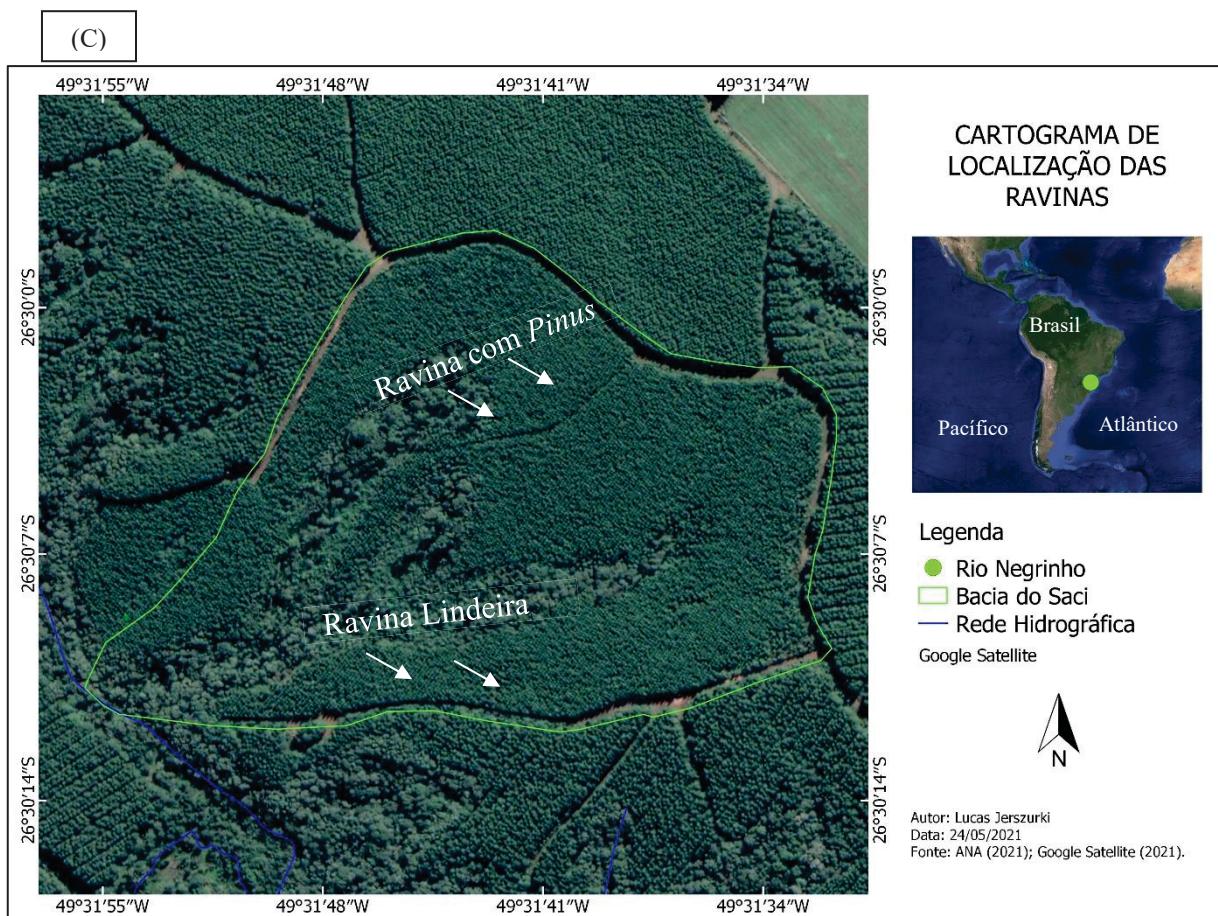
A constituição geológica local é sedimentar, proveniente da formação Itararé, composta por rochas formadas em períodos glaciais e periglaciais contidos entre o Carbonífero Superior e Permiano Médio. De modo geral, destacam-se os arenitos, folhelhos, siltitos com grânulos, seixos e matações pingados (CPRM, 2014). A pedologia pode ser descrita pelos cambissolos háplicos argilosos brunos avermelhados e amarelados de origem sedimentar, com profundidades variando entre 0,6 e 1,5 metros (EMBRAPA SOLOS, 2004).

O uso do solo na bacia hidrográfica é caracterizado pelo cultivo de *Pinus taeda*, com a presença de estradas não pavimentadas que ligam as diferentes porções de plantio. As estradas não pavimentadas recebem a maior parte do fluxo de veículos pesados durante o processo de carregamento e transporte dos troncos, permanecendo o restante do tempo abandonadas. O último período de utilização intensa das estradas citadas com atividades de extração de troncos e plantio de árvores de *Pinus* foi em 2014.

Nos trechos de estrada localizados no divisor de águas não foram identificados processos erosivos intensos, ao contrário dos trechos dispostos longitudinalmente sobre as vertentes, em que foram localizados dois trechos de estradas com uma ravina cada. A primeira ravina, denominada “Ravina com *Pinus*”, apresentava cobertura de árvores de *Pinus* instaurada após a última colheita, onde árvores foram plantadas por toda a extensão da estrada visando a redução da erosão, implicando na desativação da estrada. A segunda ravina, denominada “Ravina Lindeira”, desenvolveu-se sobre uma estrada que estabelecia o limite da bacia hidrográfica experimental do Rio Saci, atuando como estrutura limitante para os processos hidrogeomorfológicos da bacia. A principal característica da Ravina Lindeira é o solo exposto ao longo de toda a sua extensão, apresentando apenas porções centrais com vegetação rasteira (FIGURA 2).

FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DAS RAVINAS (A) NA ESTRADA COM COBERTURA DE *PINUS* E (B) NA ESTRADA COM SOLO EXPOSTO, (C) E CARTOGRAAMA COM LOCALIZAÇÃO DAS RAVINAS NA BACIA, INSERIDAS NA ZONA DE POVOAMENTO DE *PINUS*. AS

ESTRADAS ADQUIREM RELEVÂNCIA PARA A BACIA DO RIO SACI PELA SUA GRANDE QUANTIDADE (OITO).

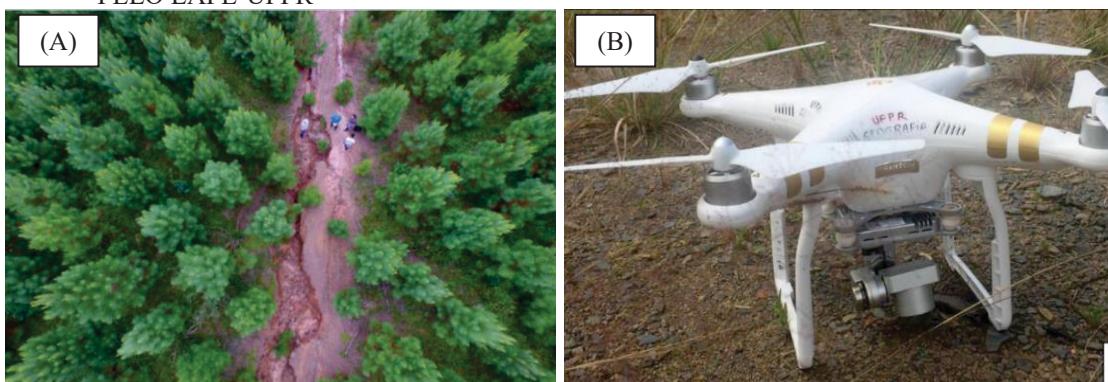


Para a análise espacial, foram utilizados dados de levantamento altimétrico e imageamento produzidos com RPA sobre as Ravinas com *Pinus* e Lindeira (Laboratório de Hidrogeomorfologia – LHG/UFPR), no ano de 2017 (FIGURA 3a), com drone *Phantom 3*

Professional (FIGURA 3b), disponibilizado pelo Laboratório de Análise de Padrões Espaciais (LAPE/UFPR).

O voo do drone foi realizado sem pontos de controle, com 70% de recobrimento longitudinal e 60% transversal, sendo utilizadas apenas as coordenadas GNSS do equipamento. A distância focal da câmera foi de 3,61 mm. Detalhes do processamento podem ser verificados no trabalho de HUNG *et al.* (2018).

FIGURA 3 - (A) IMAGEAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO DA RAVINA COM *Pinus*, E (B) DRONE MODELO PHANTOM 3 UTILIZADO NO VÔO, COM CÂMERA ACOPLADA, FORNECIDO PELO LAPE-UFPR



FONTE: O AUTOR (2017); HUNG *ET AL.* (2018).

Na Ravina com *Pinus*, a presença de *Pinus* no antigo leito da estrada (FIGURA 3a) aliada às menores dimensões da ravina indicaram a necessidade de um voo mais baixo (20 m de altura), para proporcionar pixel de aproximadamente 1 cm. A Ravina Lindeira foi imageada com voo de 60 m de altura, onde a ausência de vegetação e a presença ravina com grandes dimensões permitiram imagens com pixel de 3 cm. O erro padrão obtido (0,29 m) foi inferior ao padrão de exatidão cartográfica (0,49m) (HUNG *et al.*, 2018).

O modelo digital do terreno para a Ravina com *Pinus* foi gerado com o software *Agisoft Metashape*, baseando-se na geração da nuvem de pontos, na densificação, no filtro e na interpolação via ferramenta *Classify Points*. Devido à presença de vegetação na estrada contendo a Ravina com *Pinus*, a eliminação de parte da cobertura precisou ser realizada manualmente. O motivo deveu-se à incapacidade do programa *Agisoft Metashape* de extrair todos os dados da nuvem de pontos. O cálculo da área interpolada foi realizado no software QGIS. Para a Ravina Lindeira, utilizou-se o modelo digital de superfície (MDS) de Hung *et al.* (2018), obtido com o software *Pix4D*.

Para a geração do MDT com os dados do modelo digital de superfície (MDS) gerado pelo drone, empregou-se técnicas de filtragem e interpolação de dados. O software *Agisoft Metashape* foi utilizado para realizar o alinhamento das fotos, densificação dos pontos de

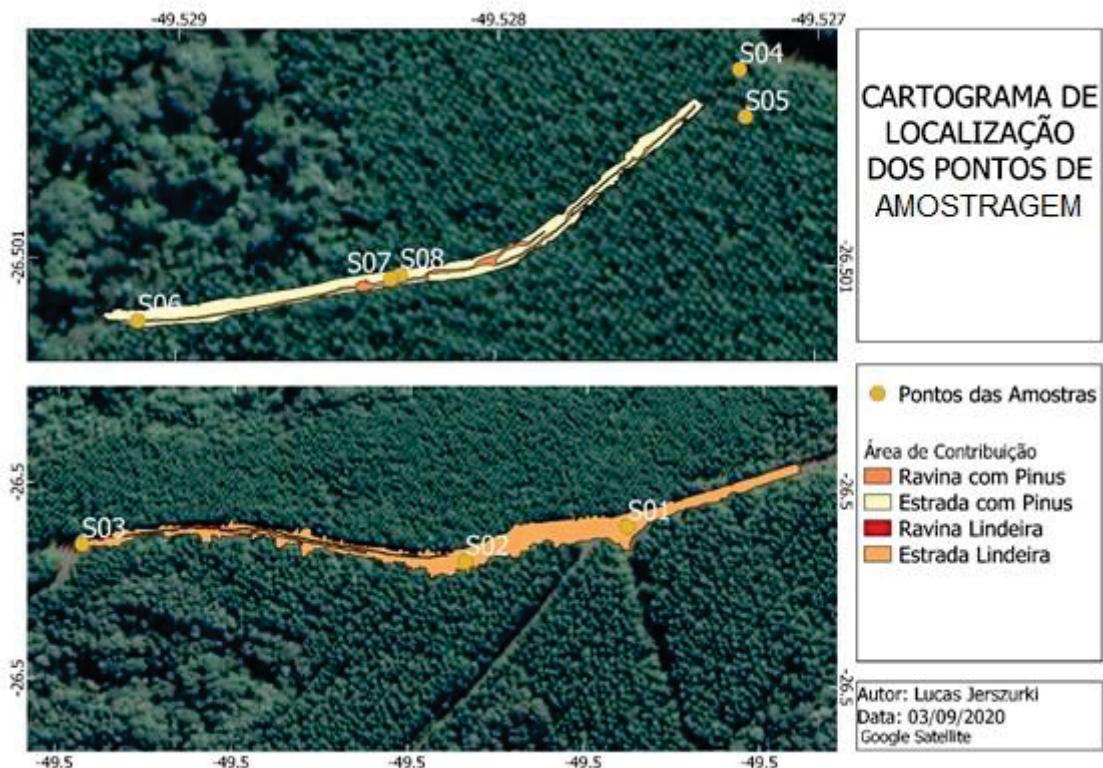
controle, filtragem de objetos e interpolação de zonas sem dados. A interpolação foi realizada com metodologia padrão, calculando-se círculos ao redor dos pontos que cobriam automaticamente os buracos na malha (AGISOFT, 2019, p.28).

Os parâmetros morfométricos de comprimento, largura, profundidade, declividade, áreas de contribuição e perfis transversais e longitudinais foram obtidos por meio de geoprocessamento no QGIS. O mapa com direções de fluxo, necessário para o cálculo da área de drenagem, foi gerado com a aplicação do *PCRaster*. O volume foi obtido por interpolação bilinear por *spline* aplicada sobre o vazio de *pixels* criado após a extração manual da ravina do MDT (ARANA *et al.*, 2016).

Para compreensão da dinâmica erosiva, foram levantados alguns parâmetros hidrogeomorfológicos: coesão do solo; granulometria do solo/sedimentos; infiltração; e condutividade hidráulica saturada. A presença de fragmentos de rochas, de pedestais e de crosta na superfície do solo das estradas foi avaliada qualitativamente por meio de observações em campo.

A localização das amostragens foi definida visando caracterizar as ravinadas e áreas de contribuição em sua extensão, levando em conta a impossibilidade de realização dos ensaios no relevo acidentado e coberto de vegetação (FIGURA 4). Os pontos S03 e S06 foram estabelecidos no exutório das ravinadas, enquanto os pontos S01, S04, S05 e S07 foram definidos sobre a superfície da estrada ou no barranco. O ponto S02 foi coletado em um depósito de sedimentos sobre a estrada da Ravina Lindeira. O ponto S08 foi definido na porção central da ravina com *Pinus*.

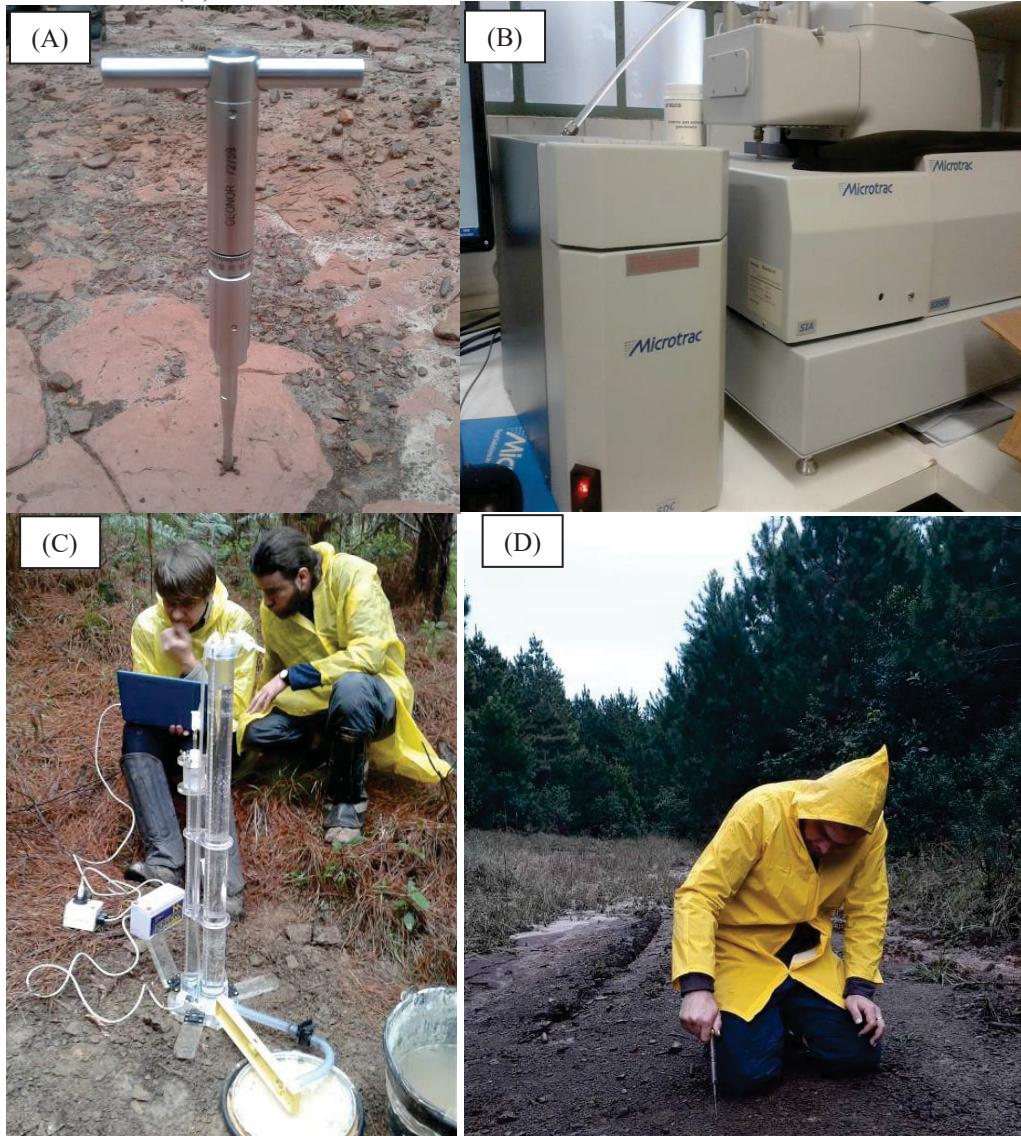
FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DE PARTÍCULAS DE SOLO PARA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA, ENSAIOS DE COESÃO, INFILTRAÇÃO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (S01 A S08)



A coesão foi avaliada utilizando-se Teste de Palhetas ou *Vane Tester* (FIGURAS 5a e 5d). O procedimento é normatizado pela ABNT 10905/89 e consistiu na inserção de uma haste com aletas fixadas na ponta no interior do solo saturado, e posterior rotação até a ruptura do material (ZIMBONE *et al.*, 1996; TAKKEN *et al.*, 1999). Foram feitos ensaios na superfície das estradas e no interior das ravinas. As leituras no corpo da haste foram realizadas após a finalização do ensaio, e indicam a resistência ao cisalhamento do solo em condições saturadas pelo escoamento superficial (RAUWS; GOVERS, 1988) e efeito *splash* (AL DURRAH; BRADFORD, 1982). O instrumento foi disponibilizado pelo LHG.

A análise granulométrica (FIGURA 5b) foi realizada conforme Christofolletti e Moreno (2017), com um granulômetro laser (marca *Microtrac*) disponibilizado pelo Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR - UFPR). Foram coletadas oito amostras deformadas, S03, S05, S06 e S07 no interior das ravinas, e S01, S02, S04 e S08 na superfície da estrada. As amostras foram inseridas em pequenas porções no interior do equipamento, que forneceu os resultados após alguns segundos de análise.

FIGURA 5 - MEDIÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO DAS RAVINAS: (A) TESTE DE PALHETAS OU *VANE TESTER*; (B) GRANULÔMETRO MARCA *MICROTRAC* DISPONIBILIZADO PELO LAMIR-UFPR; (C) ENSAIO DE INFILTRAÇÃO REALIZADO PELA EQUIPE DO LHG EM CAMPO E (D) TESTE DE PALHETAS REALIZADO NA ESTRADA DA RAVINA LINDEIRA



O ensaio de infiltração (FIGURA 5c) foi realizado com o uso de infiltrômetro de tensão a disco (SMETTEM; CLOTHIER, 1989; ANTONINO *et al.*, 2001), modelo 09.09 *Tension Infiltrometer*, marca *Eijkelkamp*. Foram empregadas colunas de água com 9 e 30 cm de altura, fornecendo resultados de condutividade hidráulica e infiltração média nas equações de Wooding (1968) (Equação 1), e de Gardner (1958) (Equações 2 e 3) (EIJKELKAMP, 2020).

$$Q = \pi r^2 K \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \quad (1)$$

$$Q(h_1) = \pi r^2 K_{sat} \exp(\alpha h_1) \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \quad (2)$$

$$\alpha = \left[\frac{\ln [Q(h_2)/Q(h_1)]}{h_2 - h_1} \right] \quad (3)$$

Em que: Q é o volume de água que entra no solo por unidade de tempo ($\text{cm}^3 \text{ h}^{-1}$), r é raio do círculo utilizado no infiltrômetro de tensão (cm), K é a condutividade hidráulica (cm h^{-1}), α é um parâmetro constante (adimensional), K_{sat} é condutividade hidráulica saturada (cm h^{-1}), $Q(h_1)$ e $Q(h_2)$ são a infiltração para uma altura de coluna d'água utilizada nos experimentos 1 e 2, respectivamente ($\text{cm}^3 \text{ h}^{-1}$), h_1 e h_2 são alturas de coluna d'água empregadas no infiltrômetro em diferentes ensaios (cm).

4.3. RESULTADOS

O MDT da Ravina com *Pinus* sofreu modificações com a interpolação sobre aos vazios na malha de *pixels*, em que a representação altimétrica de árvores de *Pinus* precisou ser eliminada. Os vazios representaram aproximadamente 40% da área do MDT. O MDT da Ravina Lindeira não apresentou interpolações, apesar do tamanho maior do *pixel*.

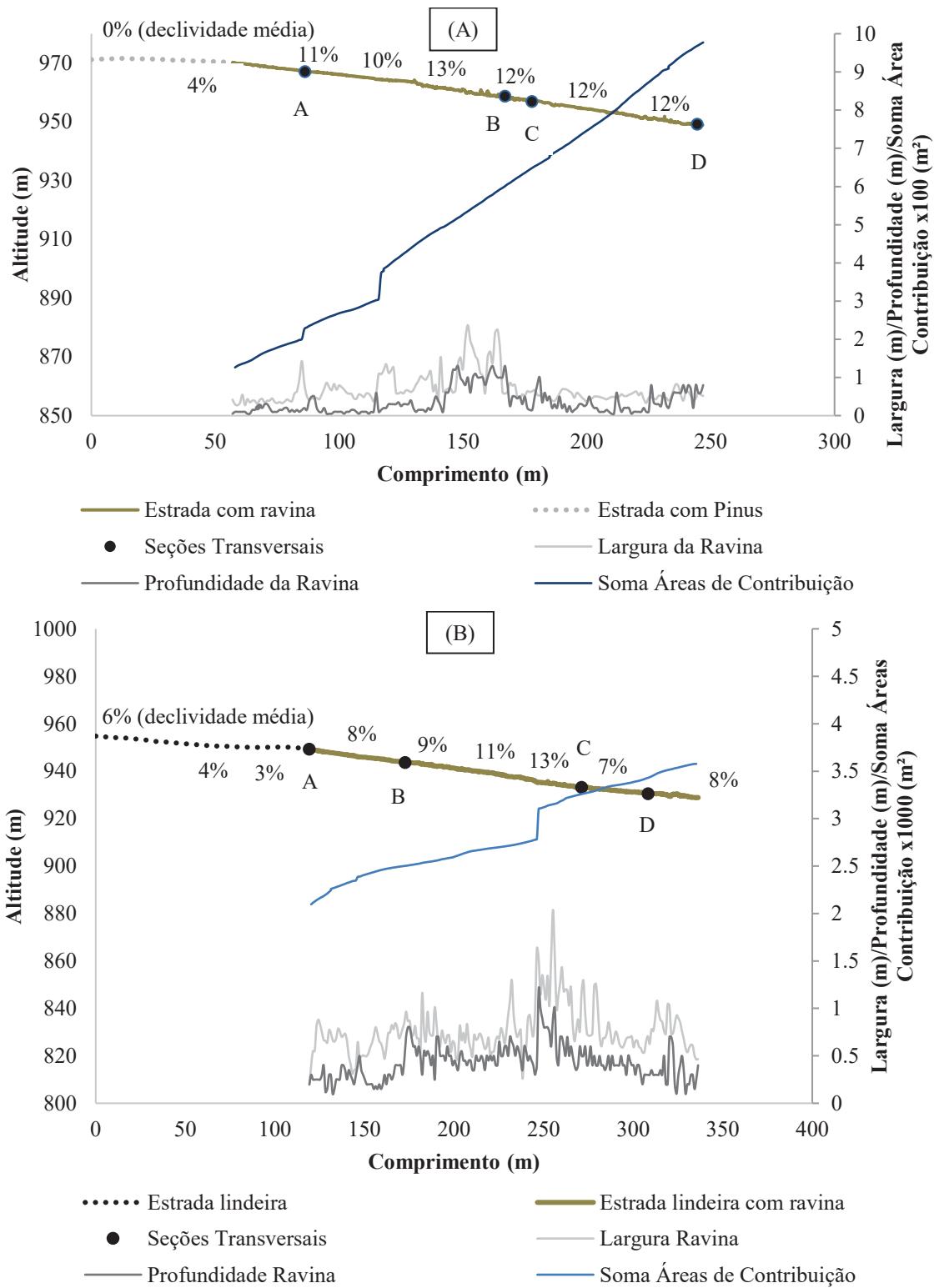
A Ravina com *Pinus* tem proporção menores em comparação à Ravina Lindeira, conforme pode ser constatado em sua área de drenagem, comprimento, área ocupada e volume (Tabela 1), mas a largura máxima é maior. Proporcionalmente, a Ravina com *Pinus* ocupa comprimento (77%) e área (21%) maiores em relação às proporções da estrada do que a Ravina Lindeira (63% do comprimento e 10% da área da estrada).

TABELA 1 – ÁREAS (m^2), COMPRIMENTOS (m), VOLUMES (m^3), LARGURAS (m) E PROFUNDIDADES (m) DAS RAVINAS COM *PINUS* E LINDEIRA E RESPECTIVAS ESTRADAS AVALIADAS

Parâmetro Morfométrico	Ravina com <i>Pinus</i>	Ravina Lindeira
Área de drenagem total (m^2)	994,5	3482,4
Área de drenagem à montante da ravina (m^2)	109,2	2085,8
Declividade média (%)	9,0	7,9
Comprimento da estrada à montante da ravina (m)	54,6	123,7
Comprimento da estrada com a ravina (m)	246,0	338,0
Volume (m^3)	14,1	50,1
Área Ocupada pela Ravina (m^2)	210,5	342,0
Comprimento Ravina (m)	191,4	214,3
Comprimento de todos os canais de ravinias (m)	231,1	329,9
Maior largura (m)	2,3	2,1
Menor largura (m)	0,5	0,5
Maior profundidade (m)	1,3	1,2
Menor profundidade (m)	0,1	0,1
Resolução do MDT (cm)	1,0	3,0

Verificou-se grande variabilidade nas larguras das ravinias ao longo do comprimento, com alterações de metros em pequenas distâncias (FIGURA 6). A Ravina com *Pinus* apresentou as maiores larguras máximas (mais de 2,3 m), pouco superior às verificadas na Ravina Lindeira (2,1 m). A maior parte das medições de larguras situaram-se abaixo de 1 m para ambas as ravinias, com valores próximos a 0,5 m para a Ravina com *Pinus*. A largura média ao longo de todo o perfil longitudinal ficou em 0,75 e 0,77 m para as ravinias com *Pinus* e Lindeira, respectivamente. Os valores médios foram semelhantes, apesar da grande variabilidade ao longo do comprimento.

FIGURA 6 - COMPRIMENTO, LARGURA, PROFUNDIDADE E ÁREAS DE CONTRIBUIÇÃO DAS RAVINAS (A) COM *PINUS* E (B) LINDEIRA. AS MEDIÇÕES FORAM REALIZADAS A CADA UM METRO, E PARA O PERFIL LONGITUDINAL INICIARAM-SE NA PORÇÃO INICIAL DAS ESTRADAS



A semelhança entre as larguras médias das ravinas analisadas pode estar associada à similaridade da declividade em ambas as feições, conforme indica o perfil longitudinal de cada

uma (FIGURA 6). Aproximadamente 260 metros do início da estrada logo após as maiores larguras e profundidades, ocorreu redução das proporções da Ravina Lindeira.

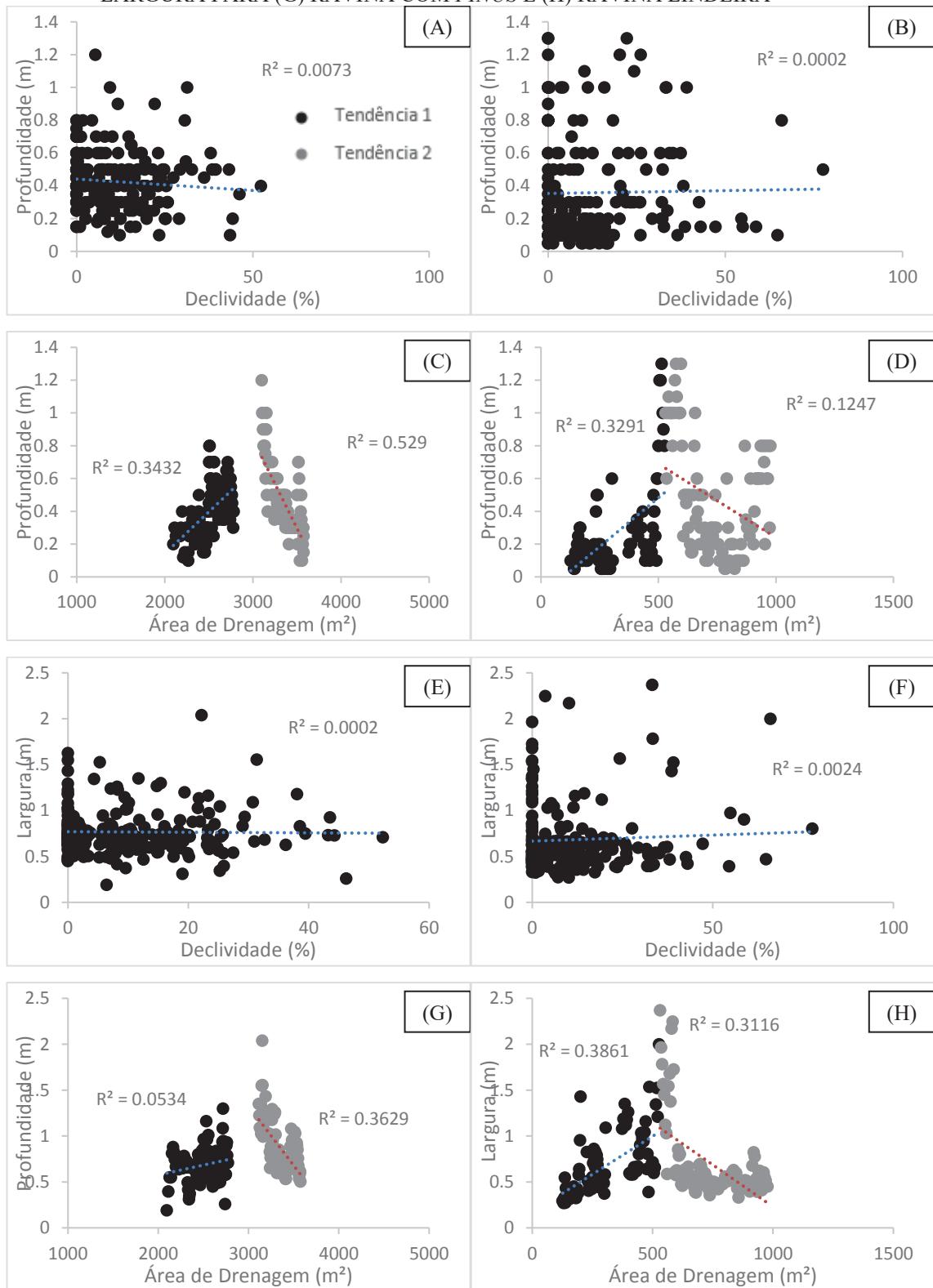
Na Ravina Lindeira é perceptível a mudança brusca de declividade na porção superior (FIGURA 6), quando se inicia a formação da ravina. Na Ravina com *Pinus*, a mudança é menos abrupta, iniciando-se na porção mais declivosa do que à montante. À jusante é evidente o aumento da declividade à 130 m da porção alta da vertente. Apesar disso, a relação entre declividade (%) e largura (m) ou profundidade (m) não apresentou R^2 acima de 0,1 (FIGURA 7). A ação conjunta das variáveis de declividade, área de drenagem (intersecção entre o canal principal e canais secundários) e características do solo determinou a ocorrência de elevadas profundidades com grandes larguras entre 130 e 170 m na Ravina com *Pinus*, bem como entre 240 e 260 m na Ravina Lindeira.

Observou-se que a área de contribuição proporcionou aumentos bruscos nas proporções dos canais, devido ao encontro da ravina principal com canais menores que deságuam no interior do sulco principal. Esse aspecto pode ser verificado a aproximadamente 250 m da Ravina Lindeira e entre 85 e 115 m na Ravina com *Pinus*, em que a largura e profundidade das ravinias aumentam. Apesar disso, a relação entre área de contribuição (m^2) e profundidade (m) ou largura (m) da Ravina Lindeira apresentou duas tendências: positiva até os 3000 m^2 e negativa após os 3000 m^2 (FIGURA 7). O mesmo comportamento foi observado para a Ravina com *Pinus*.

O valor médio de profundidade foi de 0,37 m para a Ravina com *Pinus* e 0,43 m para a Ravina Lindeira. Na Ravina com *Pinus* não foram identificados indícios de controle por alteração de camadas de solo. Na Ravina Lindeira, ao contrário, uma camada mais resistente de material argiloso predominou no fundo, diminuindo sua expansibilidade vertical e promovendo seu aumento lateral por erosão de paredes.

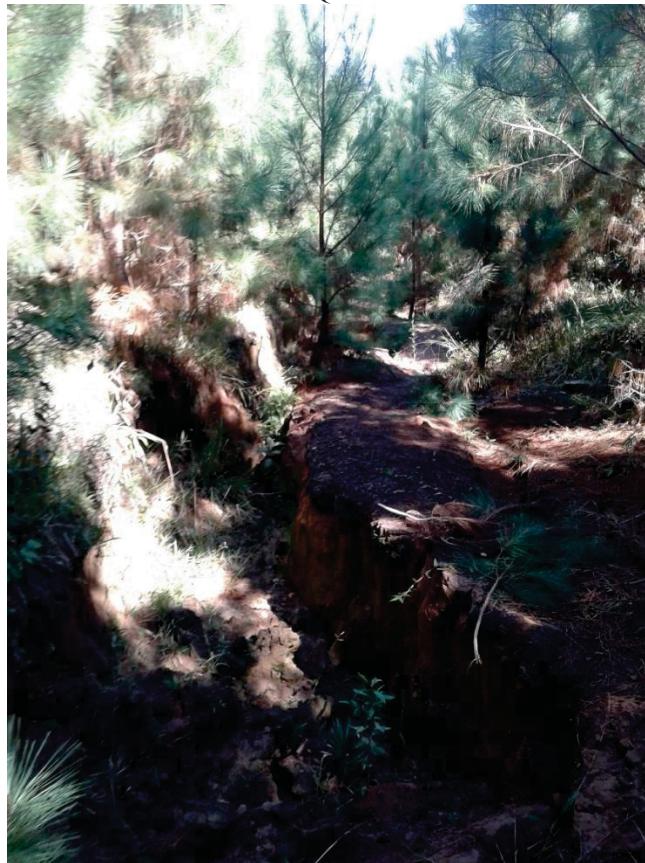
A camada argilosa mais resistente se apresentou de duas formas: *i*) Nas porções com maior altitude verificou-se transição argilosa entre o cambissolo na superfície e folhelho na profundidade; e *ii*) Nas partes com menor altitude, verificou-se transição direta do solo para o folhelho, onde a camada de cambissolo está em contato direto com lâminas de material mais resistente, que se fraturaram partindo dos planos horizontais. A camada de folhelho foi identificada por Schultz (2017) em levantamento caracterizando a bacia hidrográfica do Rio Saci.

FIGURA 7 – DECLIVIDADE VERSUS PROFUNDIDADE PARA (A) RAVINA COM PINUS E (B) RAVINA LINDEIRA; ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO VERSUS PROFUNDIDADE PARA (C) RAVINA COM PINUS E (D) RAVINA LINDEIRA; DECLIVIDADE VERSUS LARGURA PARA (E) RAVINA COM PINUS E (F) RAVINA LINDEIRA; E ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO VERSUS LARGURA PARA (G) RAVINA COM PINUS E (H) RAVINA LINDEIRA



A Ravina com *Pinus* apresenta aspecto morfológico diferente da Ravina Lindeira, tendo alargamento abrupto na porção central (FIGURA 8), enquanto a Lindeira apresenta alteração mais suave e prolongada da seção transversal à jusante. A Ravina com *Pinus* também está localizada em maior altitude (entre 970 e 950 m) que a Ravina Lindeira (entre 960 e 930 m), o que contribui para não atingir a camada mais resistente de solo subjacente.

FIGURA 8 - PORÇÃO CENTRAL DA RAVINA COM *PINUS*, COM ALARGAMENTO DO CANAL OCASIONADO PELAS DEPRESSÕES. PEQUENOS ARBUSTOS SE DESENVOLVERAM NO INTERIOR DO CANAL EM MEIO AOS CONGLOMERADOS DE SOLO QUE DESABARAM DAS PAREDES



A morfologia das ravinas apresentou as chamadas piscinas de imersão, *knickpoints* (RENGERS; TUCKER, 2014), *plunge pools* (STEIN; JULIEN, 1993) ou depressões (OLIVEIRA, 2007, p.63) desenvolvidas em seu no leito (OOSTWOUD *et al.*, 2000), semelhantes a diversas cabeceiras ao longo das feições (HEEDE, 1975), principalmente na Ravina Lindeira.

As larguras das ravinas foram maiores na porção mediana da encosta, onde estão presentes as maiores depressões (STEIN; JULIEN, 1993; ROBINSON; HANSON, 1994; BENNETT *et al.*, 1997). A Ravina com *Pinus* não apresentou a mesma quantidade de

depressões (treze, no total) quando comparada à Ravina Lindeira (vinte e uma, no total) em contagem realizada sobre as imagens de RPA (FIGURA 9).

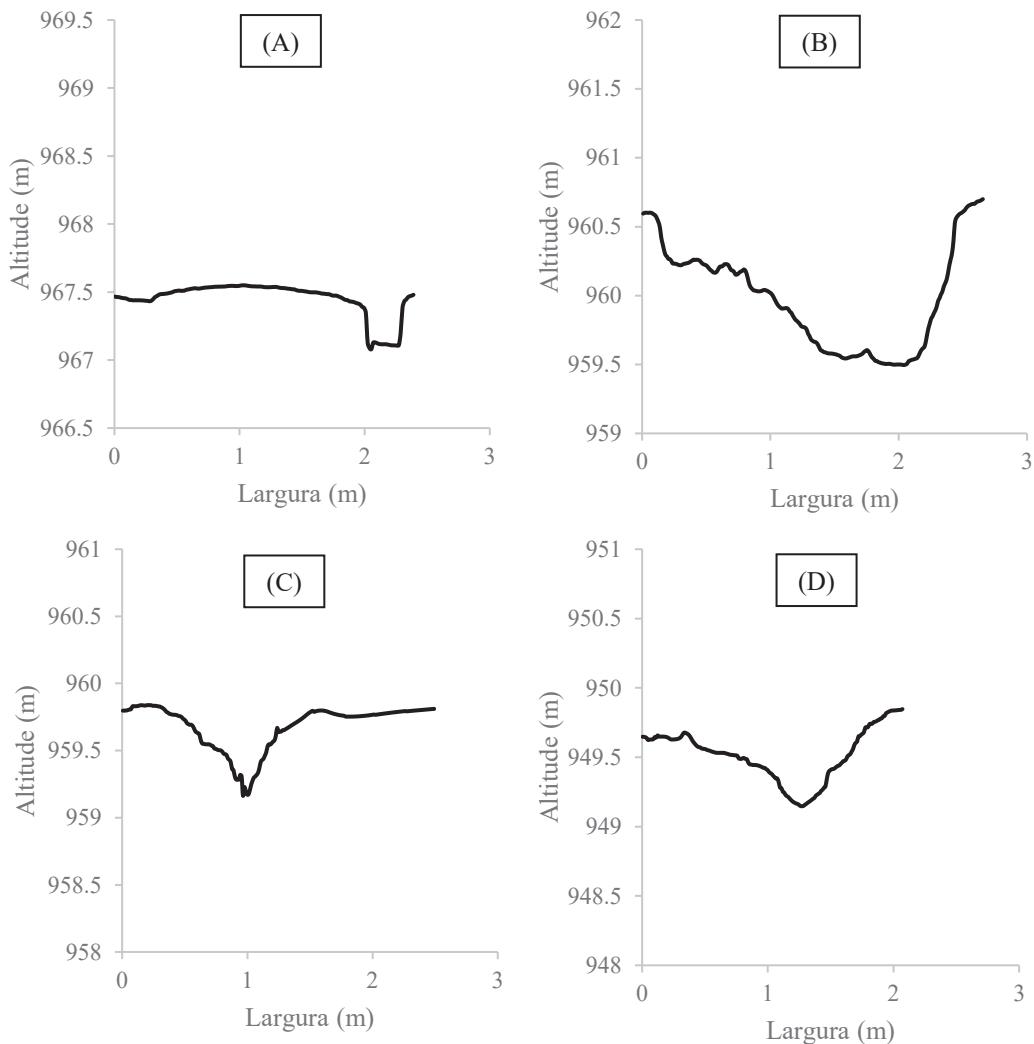
FIGURA 9 - DEPRESSÕES VERIFICADAS NA RAVINA LINDEIRA: (A) NA PORÇÃO SUPERIOR, COM APENAS UMA CAMADA DE SOLO VISÍVEL; E (B) NA PORÇÃO MÉDIA, COM UMA CAMADA DE SOLO SOBREJACENTE À CAMADA ARGILOSA MAIS RESISTENTE



As profundidades máximas nas ravinadas analisadas também ocorreram nas porções de média encosta, onde as larguras são maiores. O motivo deveu-se às condições de formação de depressões, conforme comentado anteriormente. A erosão devido ao deflúvio que se projeta de um patamar à montante ocasiona o aprofundamento das depressões até atingir o equilíbrio (STEIN; JULIEN; ALONSO, 1993; STEIN; JULIEN, 1993; RENGERS; TUCKER, 2014).

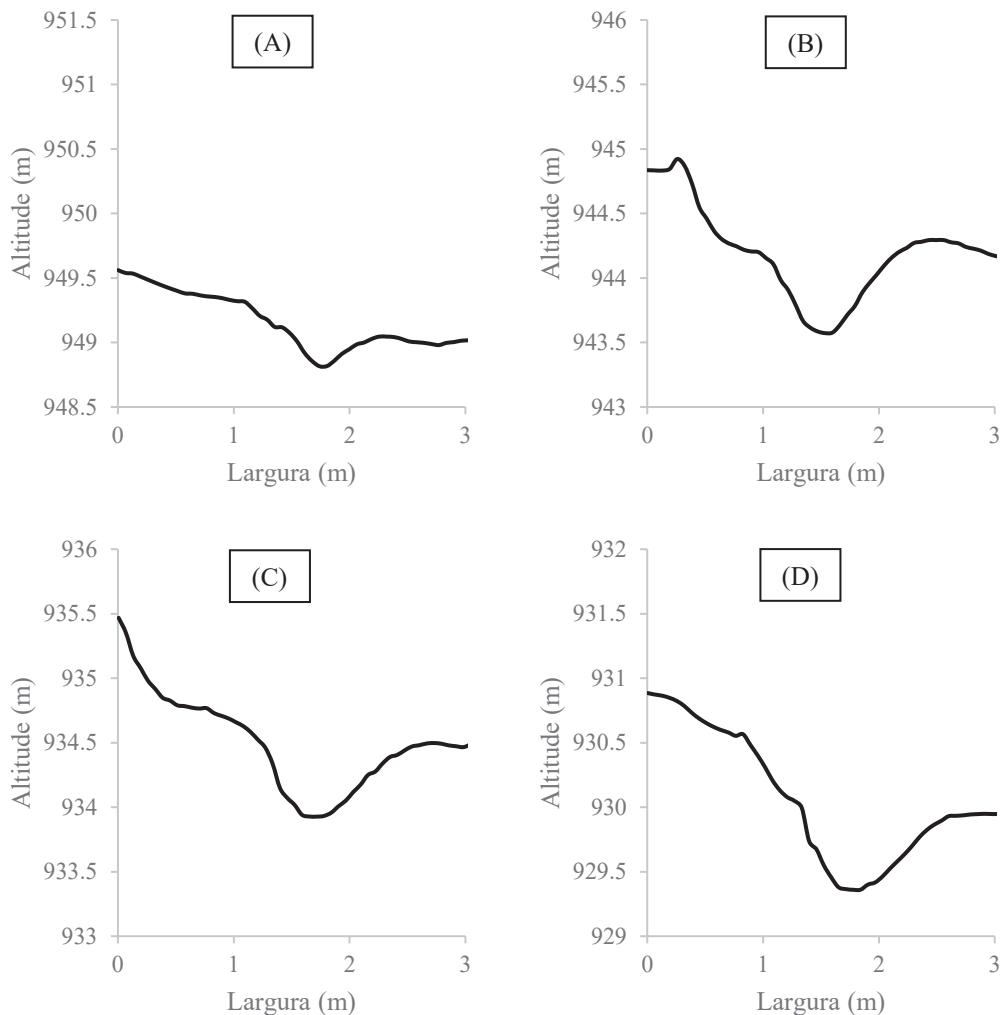
Para realizar os perfis transversais da Ravina com *Pinus* (FIGURA 10) foram escolhidos pontos que pudessem caracterizar o aspecto morfológico da feição erosiva. A localização exata dos perfis pode ser identificada na FIGURA 6. Apesar da grande variabilidade morfométrica da ravina foi possível observar perfis em formato de “V” pronunciado, com o fundo bastante afinado.

FIGURA 10 - PERFIS TRANSVERSAIS DA RAVINA COM *PINUS*: (A, B) PORÇÕES SUPERIORES; E (C, D) PORÇÕES INFERIORES DA VERTENTE, INDICANDO VARIADOS FORMATOS COM PREDOMINÂNCIA DE PERFIS EM “V”. A POSIÇÃO DOS PERFIS NA RAVINA FOI INDICADA NA FIGURA 6A.



Na Ravina Lindeira os perfis transversais apresentaram formação de fundos mais arredondados (FIGURA 11), devido à mudança de camada de solo com o aprofundamento da feição atingindo a camada mais coesa, segundo as medições empreendidas em campo com o Teste de Palhetas.

FIGURA 11 - PERFIS TRANSVERSAIS DA RAVINA LINDEIRA: (A, B) PORÇÕES SUPERIORES; E (C, D) PORÇÕES INFERIORES, ILUSTRANDO VARIADOS FORMATOS COM PREDOMINÂNCIA DE PERFIS EM “U”. A POSIÇÃO DOS PERFIS NA RAVINA FOI INDICADA NA FIGURA 6B.



Na Tabela 2, encontram-se a coesão das camadas à erosão do solo para os pontos amostrados com o ensaio de palhetas, bem como apenas alguns valores de infiltração média (mm h^{-1}) e condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1}). Os ensaios dos pontos A-S03 e A-S06 apresentaram erros e variações que impediram a determinação da infiltração e condutividade hidráulica saturada. Os ensaios A-S02 e A-S04 não forneceram resultados de condutividade hidráulica saturada constantes, por isso foram descartados. Os principais problemas foram a presença fissuras no solo e o vazamento de água no contato entre o disco e o solo.

No ponto S08 não foi realizado ensaio de infiltração, devido à incapacidade de instalação do infiltrômetro na ravina. Os resultados de coesão para o ponto S07 incorporam as medições no interior da ravina do ponto S08.

TABELA 2 - VALORES DE COESÃO OBTIDOS COM TESTE DE PALHETAS, INFILTRAÇÃO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO MEDIDAS COM INFILTRÔMETRO DE TENSÃO PARA OS PONTOS AMOSTRADOS AO LONGO DAS RAVINAS

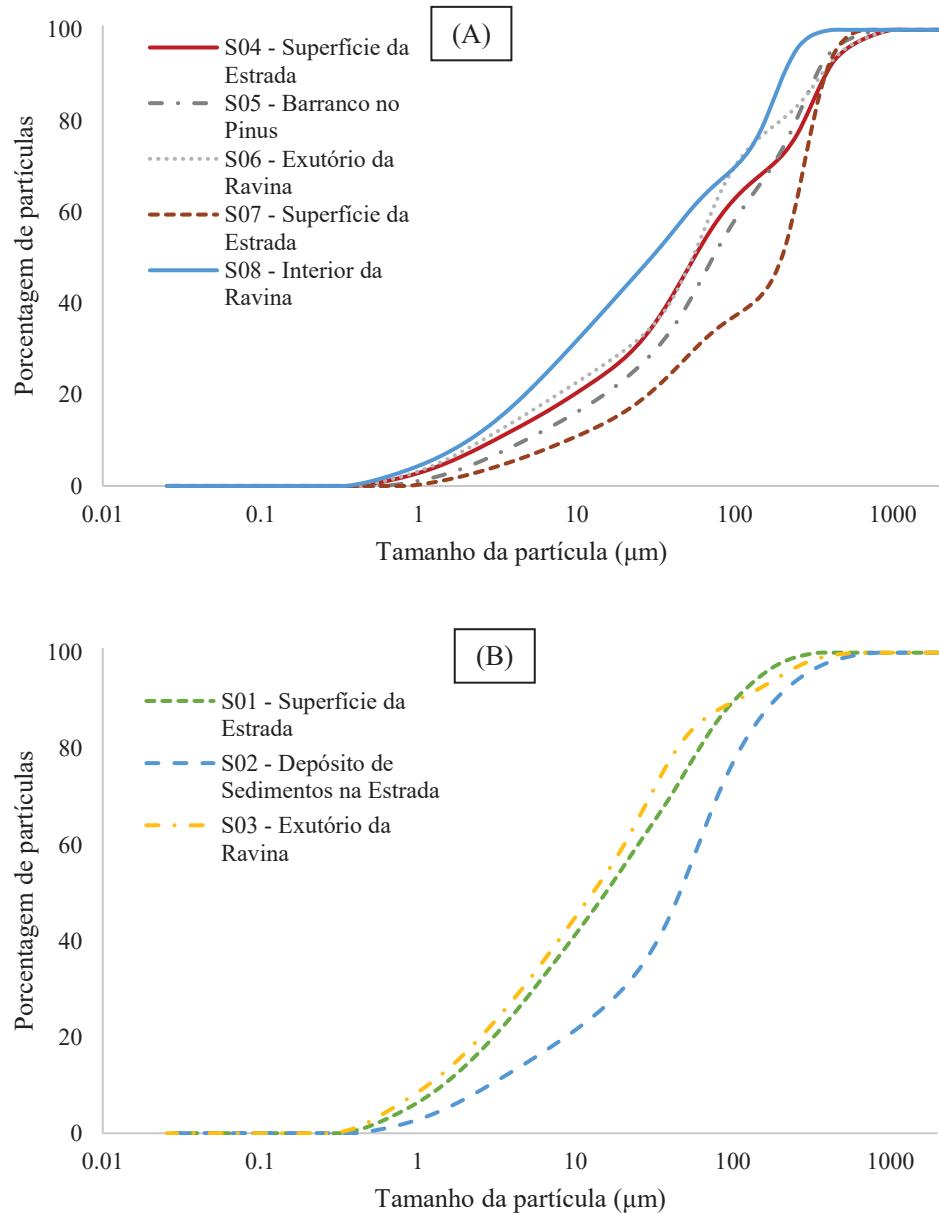
Parâmetro	Pontos Amostrados						
	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Coesão (KPa)							
Ensaio 1	260	9	124	85	38	84	64
Ensaio 2	218	60	160	78	40	81	84
Ensaio 3	260	116	126	29	58	35	81
Ensaio 4	120	103	72	29	18	9	35
Ensaio 5	260	44	54	55	18	24	9
Ensaio 6	260	48	138	54	28	80	24
Infiltariação média (mm h⁻¹)	0,43	15,08	-	11,05	65,18	-	23,79
Condutividade Hidráulica Saturada (mm h⁻¹)	0	Erro	-	Erro	0,48	-	0,11

Nas áreas com maior coesão, a infiltração foi reduzida (0,43 mm h⁻¹; S01) em relação às áreas com menor coesão (entre 11,05 e 65,18 mm h⁻¹; S04 e S05). Os maiores valores de infiltração média ocorreram em áreas com vegetação de *Pinus* (S05) e na superfície da estrada da Ravina com *Pinus* (S07), enquanto as menores se situam no leito das estradas, nas porções entressulcos das ravinas (S01, S02 e S04).

Para os pontos de amostragem da Ravina com *Pinus* a coesão variou bastante, sendo mais alta no antigo leito da estrada em comparação com o interior da floresta de *Pinus* das porções laterais, comprovando as condições de compactação da estrada. Mesmo assim, a coesão medida na Ravina com *Pinus* é bem inferior à obtida na camada argilosa aflorada mais resistente da Ravina Lindeira.

A camada argilosa possui partículas reduzidas (FIGURA 12). As amostras S01 e S03 apresentaram partículas menores que a S02, coletada em um acúmulo de sedimentos proporcionado pela queda da declividade da estrada.

FIGURA 12 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA REALIZADA EM GRANULÔMETRO A LASER PARA DIFERENTES PONTOS AMOSTRAIS: (A) RAVINA COM *PINUS* E (B) RAVINA LINDEIRA, COM DESTAQUE PARA AS GRANDES VARIAÇÕES DE GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS

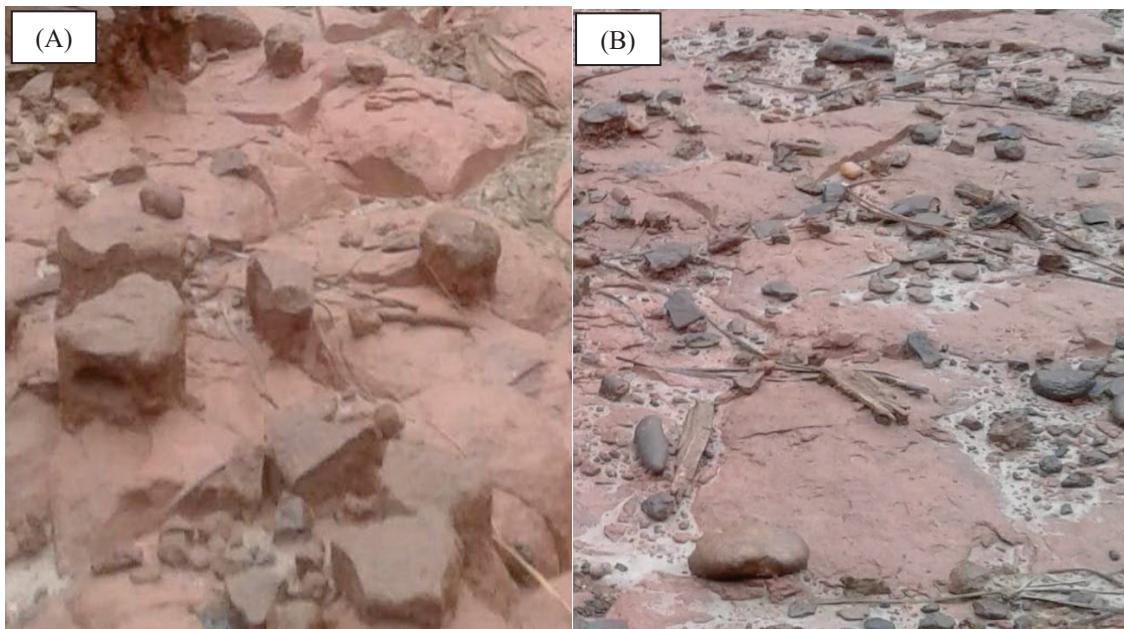


A granulometria do solo das ravinas é bastante variada, dependendo da localização do ponto de coleta das amostras. Os pontos no interior das ravinas (S03, S06 e S08) apresentam maior proporção de partículas menores (50% das partículas < 30 μm). Os pontos localizados nos barrancos das estradas ou divisor à montante do ponto de monitoramento apresentaram partículas maiores (50% entre 90 e 200 μm).

Na superfície das estradas, os fragmentos de rochas se mostraram relevantes, afetando a erosão por *splash* em diversos pontos verificáveis por meio da presença de pequenos pedestais

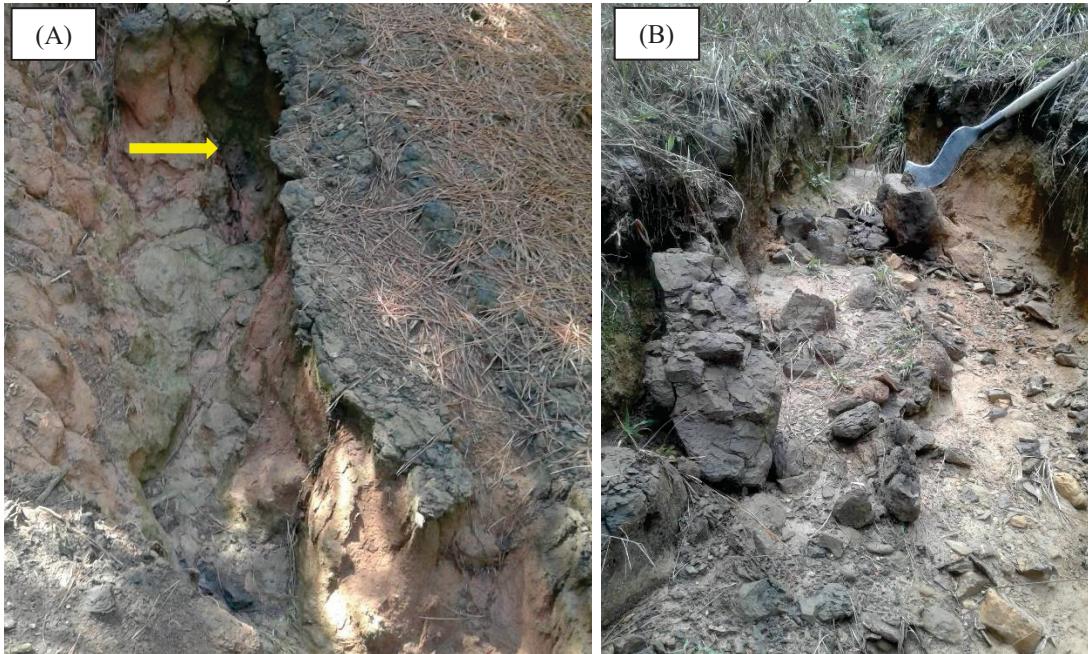
(FIGURA 13a). Os pedestais foram formados pela presença de rochas depositadas sobre a superfície (FIGURA 13b), impedindo que as gotas de chuva atingissem o solo menos resistente abaixo. O resultado é que o efeito *splash* promoveu erosão ao redor do fragmento de rocha, fazendo com que o restante da superfície fosse transportado à jusante, enquanto se formou um pedestal de solo embaixo do fragmento rochoso (POESEN; TORRI; BUNTE, 1994).

FIGURA 13 - TRECHOS DA ESTRADA DA RAVINA LINDEIRA COM DESTAQUE PARA: (A) PEDESTAIS LOCALIZADOS NA SUPERFÍCIE E (B) FRAGMENTOS DE ROCHA DEPOSITADOS SOBRE O SOLO



Na FIGURA 14a verifica-se o fenômeno de crosta que se desenvolveu na superfície do solo exposto na Ravina com *Pinus*. A resistência da crosta impediu que a camada superficial do solo desabasse para o interior da ravina, enquanto o material subjacente foi erodido e transportado pela dinâmica erosiva do deflúvio. Além da crosta superficial, foi possível identificar uma camada de acículas de *Pinus* cobrindo o solo, que juntamente com as acículas que são transportadas para o interior das ravinas, se acumulam em estreitamentos ao longo do canal, influenciando a erosão e o transporte no local. Na FIGURA 14b, tem-se as paredes verticais onde falhas ocorreram abaixo da camada superficial, ilustrando desabamentos de paredes característicos dessa feição erosiva.

FIGURA 14 – (A) OCORRÊNCIA DE CROSTA SUPERFICIAL EM SOLO EXPOSTO ADJACENTE AO CANAL DA RAVINA COM *PINUS*, COM DESABAMENTOS DO MATERIAL SUBJACENTE E RESQUÍCIOS DA CROSTA PROJETANDO-SE SOBRE O CANAL, E (B) DEPÓSITOS DE GRANDES AGLOMERADOS DE SEDIMENTOS PROVENIENTES DE DESABAMENTOS DE PAREDES NA RAVINA LINDEIRA, COM DESTAQUE PARA VEGETAÇÃO DE GRAMÍNEAS DESENVOLVIDA NA PORÇÃO ENTRESSULCOS



4.4. DISCUSSÃO

Os erros na determinação da profundidade de ravinamentos foram descritos por Daba, Rieger e Strauss (2003), utilizando imagens aéreas com tamanhos de pixel variando entre 2 e 20 m. Para Marzolff e Poesen (2009), mesmo com os erros inerentes ao imageamento de alta resolução de ravinamentos, a técnica ofereceu resultados com acurácia elevada. Para os MDTs do presente trabalho, não foram avaliados os erros de profundidade inerentes ao imageamento.

A vegetação no leito da estrada da Ravina com *Pinus* implicou em zonas ocultas ao imageamento que precisaram de interpolação. A vegetação da estrada da Ravina Lindeira estava presente nas porções entressulcos, composta de gramíneas esparsas e capim ralo.

Os depósitos de sedimentos presentes no interior da Ravina com *Pinus* promoveram o crescimento de pequenos arbustos e gramíneas, que contribuíram para a estabilização da erosão em algumas porções da feição, mas dificultaram o imageamento. A estabilização faz parte dos ciclos de erosão e deposição pelos quais as ravinamentos passam ao longo de sua formação (SCHUMM, 1979; MORGAN, 2005).

O plantio de *Pinus* no leito da estrada foi importante para controlar a expansão da Ravina com *Pinus*. É conhecido que as copas das árvores reduzem o impacto das gotas da chuva

e promovem a interceptação de parte da precipitação, processo descrito por diversos autores (KITTREDGE, 1948, p.279; ABRAHAMS; PARSONS; WAINWRIGHT, 1995; ZIEGLER; SUTHERLAND; GIAMBELLUCA, 2001). Por consequência, a vegetação reduz a erosão, corroborando os trabalhos de Poesen *et al.* (2003), Torri e Poesen (2014) e Zhang *et al.* (2018).

A vegetação também foi responsável pelo fim do processo de ravinamento na porção mais baixa das vertentes da Ravina com *Pinus* e da Ravina Lindeira, uma vez que as estradas terminavam em densa vegetação natural em torno das nascentes à jusante. Takken *et al.* (1999) e Beuselinck *et al.* (2000) afirmam que barreiras vegetadas impulsionam a deposição de sedimentos no seu limiar. A vegetação e a alteração da declividade, no presente trabalho, exerceram o controle erosivo citado por Takken *et al.* (1999) e por Poesen, Vandaele e Wesemael (1998).

Embora a gênese das ravinas estudadas esteja associada à presença das estradas não pavimentadas, não foi possível determinar exatamente como se iniciou o processo erosivo, devido à ausência de monitoramento em períodos anteriores. A localização das feições erosivas indica que se formaram nos sulcos formados pelos pneus das máquinas pesadas que transitavam pela via, o que promoveu rebaixamento da estrada e consequentemente concentração do escoamento. Contudo, no estágio atual de desenvolvimento, predominam resquícios que indicam desabamentos de parede, erosão promovida pelo jato de água nos desníveis e erosão por tensão de cisalhamento do deflúvio.

O desabamento das paredes devido à erosão ocasionou expansão lateral das feições, corroborando os resultados de Gordon *et al.* (2007). Esses autores afirmaram que o crescimento longitudinal da ravina devido à erosão remontante torna a cabeceira mais estreita do que o restante da ravina, o que foi observado na Ravina com *Pinus* e na Ravina Lindeira, onde a porção de meia encosta adquiriu as maiores larguras e profundidades.

A verificação da presença de ravinas nas porções mais declivosas e com maiores áreas de drenagem confirmou as afirmações de Patton e Schumm (1975), que indicaram limiares de declividade e área de drenagem para a incisão de ravinas nos vales de Piceance Creek e Yellow Creek. Contudo, os mesmos autores consideraram que outras variáveis ambientais podem contribuir no processo erosivo. As proporções das feições erosivas lineares não estão necessariamente relacionadas diretamente à altura ou inclinação da vertente, mas o volume de material erodido em estradas com ravinas pode aumentar com a maior declividade da encosta (KING, 1979). A baixa relação entre declividade, largura e profundidade nas ravinas do

presente estudo indica maior relevância da área de contribuição sobre a morfologia das ravinas, associada com propriedades do solo e condições da superfície.

As depressões também já foram correlacionadas com o tamanho da área de drenagem à montante (RENGERS; TUCKER, 2014). A concentração do escoamento superficial no terreno intensifica o destacamento e transporte de sedimentos, formando margens mais altas e rebaixando a porção erodida. Assim, uma depressão é formada e passa a se desenvolver pela turbulência do escoamento que incide sobre a área (STEIN; JULIEN, 1993; DIETRICH; DUNNE, 1993; ROBINSON; HANSON, 1994; BENNETT *et al.*, 1997), a chamada erosão por quedas d'água. As depressões podem ser formadas em chuvas intensas ou mesmo em precipitações com menor intensidade, mas contínuas (OLIVEIRA, 2007).

Outra possibilidade para a formação das depressões é a erosão remontante, que faz com que a ravina se expanda à montante, mas mantenha os resquícios de antigas cabeceiras no leito (HEEDE, 1975). Na erosão remontante ocorre o predomínio do destacamento do solo, fornecendo ambiente propício para formação de poças, dificultando a passagem da água à jusante. O acúmulo de água também pode diminuir a erosão, mediante a redução da energia do escoamento que cai da porção alta do desnível, estabelecendo relações de equilíbrio (STEIN; JULIEN; ALONSO, 1993; RENGERS; TUCKER, 2014).

As depressões e seu entorno caracterizam-se como áreas fonte de sedimentos (ZHANG *et al.*, 2018). Em associação com processos de desabamento das paredes, essas zonas ocasionam o aumento da largura e profundidade das feições erosivas lineares em vertentes (HEEDE, 1975; BENNETT *et al.*, 2000), interações que são ocasionadas pela própria dinâmica das ravinas (POESEN *et al.*, 2003). O jato de água produzido com o desnível atua na remoção das partículas de solo da depressão, fenômeno que aumenta de intensidade conforme o aumento na vazão (BENNETT *et al.*, 2000).

A erosão da depressão vai depender da altura de queda do deflúvio no desnível, determinando a intensidade da erosão e, consequentemente, a forma de expansão (ZHANG *et al.*, 2018). Segundo Poesen *et al.* (2003), esse fenômeno depende de fatores como topografia, classificação e manejo do solo, área de drenagem, regime pluviométrico, erodibilidade, profundidade do sulco e mecanismos de escoamento.

As adequações produzidas pelas próprias ravinas frente às condições externas, como no caso das depressões, representam a superação dos chamados limites geomórficos, definidos como divisores entre diferentes respostas hidrogeomorfológicas de uma feição frente às modificações internas ou externas, sugerindo que nem sempre é possível a extração dos

mecanismos erosivos entre feições para a mesma área (SCHUMM, 1979). Apesar disso, o fenômeno representa grande fonte de sedimentos nas feições (MORGAN, 2005).

Devido à ação das depressões, os maiores desabamentos das paredes foram verificados nas porções medianas das ravinas, onde blocos desagregados das paredes se depositaram no leito das ravinas. Os blocos não foram erodidos completamente no mesmo evento em que foram destacados, sofrendo a ação do intemperismo. Robinson e Hanson (1994) consideram que é necessário tempo para que todo o material proveniente de quedas de paredes seja eliminado pelo escoamento.

O carreamento dos sedimentos e blocos depositados próximos das depressões tem forte relação com eventos mais intensos, os quais conseguem transportar as partículas à jusante, enquanto eventos de menores proporções não possuem energia suficiente, criando acúmulo de material nas imediações da depressão (RENGERS; TUCKER, 2014).

A expansão das depressões também sofre influência das propriedades do solo. Quando os solos superficiais são mais resistentes à erosão do que as camadas inferiores, as feições erosivas lineares tendem a se expandir com maior intensidade quando a camada resistente é eliminada, ocorrendo a exposição do material erodível (SCHOLten, 1997). Na Ravina Lindeira ocorreu o oposto, a camada mais resistente na porção subjacente fez com que as paredes da ravina se alargassem.

Diferentes perfis do solo podem alterar a dinâmica da erosão (POESEN; VANDAELE; WESEMAEL, 1998; OOSTWOUD *et al.*, 2000; NACHTERGAELE; POESEN, 2002). Dependendo dessas características, as ravinas podem atingir profundidades consideráveis, em torno de 1 metro (MORGAN, 2005). A avaliação da coesão, da granulometria e da infiltração do solo das ravinas do presente estudo indica ampla variabilidade ao longo das encostas.

Os valores muito altos de coesão do solo para a amostra S01 estão relacionados à exposição da camada argilosa mais resistente à erosão laminar no leito da Ravina Lindeira. A camada aflorou em alguns pontos mais altos da estrada, próximos ao divisor de águas e no fundo do leito das ravinas. Houve também controle erosivo aumentando a largura da ravina em profundidade, fazendo com que o perfil transversal da porção inferior tivesse formato arredondado.

O perfil transversal das ravinas reflete o equilíbrio entre o conjunto de parâmetros relacionados. A erosão pode se intensificar, formando feições menos profundas com grandes proporções, devido à baixa coesão do perfil superior de solo. Com a intensificação das chuvas,

as ravinas tendem a apresentar paredes verticais com alto grau de desabamento, como ocorreu no presente trabalho. Em climas caracterizados por chuvas amenas e bem distribuídas as paredes são arredondadas e menos propensas à erosão (ISTANBULLUOGLU *et al.*, 2005).

Em relação à granulometria dos sedimentos erodidos, as maiores partículas nas porções entressulcos das ravinas deveram-se a erosão por efeito *splash*, ocasionando desagregação de partículas finas e seu transporte pelo escoamento laminar. Nas zonas entressulcos, o tipo de escoamento predominante é o laminar, com pequena concentração devido à topografia elevada. Dependendo do escoamento laminar na vertente, como baixa energia e reduzida velocidade de cisalhamento, há seleção das partículas carreadas, transportando sedimentos finos (GOVERS, 1985; GOVERS; POESEN, 1988). Os maiores sedimentos permanecem depositados em locais próximos à área de origem.

No escoamento concentrado em sulcos, ocorreu predomínio de erosão pela tensão de cisalhamento devido à concentração do escoamento no interior das ravinas (HORTON, 1945), fazendo com que a erosão e o transporte dos sedimentos fossem menos seletivos (GOVERS, 1985; MORGAN, 2005). A concentração da água intensificou a erosão e o transporte dos sedimentos (HORTON, 1945), tanto os finos quanto os grossos, gerando uma camada mais homogênea de material particulado depositado sobre o leito da ravina nas zonas de baixa energia. Além disso, a contribuição de sedimentos pelo desabamento de paredes promoveu a renovação da quantidade de sedimentos de diferentes granulometrias no leito da ravina.

A presença de fragmentos de rochas depositados sobre o leito da estrada influenciou a dinâmica hidrogeomorfológica das ravinas, através do retardo e da diminuição da velocidade do escoamento, interferindo nas condições de infiltração e, consequentemente, reduzindo o escoamento superficial, favorecendo a deposição de sedimentos, além de dificultar a selagem da superfície e a compactação (POESEN; TORRI; BUNTE, 1994; GOVERS, 1987).

Os fragmentos de rocha têm um efeito negativo sobre a produção de sedimentos relacionada à erosão por efeito *splash*, protegendo a superfície do solo do impacto das gotas da precipitação. Os fragmentos de rocha diminuem também a possibilidade de ocorrência de crostas superficiais formadas com a energia das gotas de chuva. As crostas diminuem a infiltração de água (selagem) e agem como uma camada mais resistente que facilita o escoamento superficial. A remoção da camada pela energia do escoamento e sua posterior formação em um novo evento de precipitação induzem alterações nas condições de erosão por efeito *splash* ao longo do tempo (ELLISON, 1945; MCINTYRE, 1958; BRYAN, 2000).

4.5. CONCLUSÕES

Os modelos digitais do terreno produzidos com a tecnologia RPA forneceram resultados satisfatórios para a análise morfométrica das ravinas de estradas não pavimentadas da área de estudo, com tamanhos de *pixel* reduzidos, apesar das incertezas quanto aos dados interpolados nas zonas vegetadas.

A Ravina com *Pinus* apresentou proporções menores (comprimento 191,4 m, volume 14,1 m³) quando comparada com a Ravina Lindeira (comprimento 214,3 m, volume 50,1 m³), excetuando-se as larguras máximas (2,3 e 2,1 m, respectivamente). A instauração de vegetação sobre o leito da estrada, como árvores de *Pinus taeda*, reduz o impacto da precipitação e, consequentemente, a erosão, proporcionando interceptação e diminuindo o efeito *splash* sobre a superfície, diminuindo a expansibilidade da ravina. A área de contribuição menor da Ravina com *Pinus* (994,5 m² frente a 3482,4 m² da Ravina Lindeira) também influenciou sobre a expansibilidade da ravina.

O aumento da declividade coincidiu com o início da formação das ravinas, e a sua combinação com a área de drenagem possibilitou o aumento das larguras e das profundidades das ravinas na meia encosta. Também foi possível identificar que as nuances entre o cambissolo, a camada argilosa de transição e a camada de folhelhos fornecem diferentes condições de erosão para a Ravina Lindeira, controlando o aprofundamento da incisão.

Identificou-se transporte seletivo nas porções entressulcos e arraste de grande quantidade de partículas de variados tamanhos no escoamento concentrado em sulcos. A coesão do solo também apresentou variações importantes no espaço, permitindo identificar que perfis de solo mais coesos são mais difíceis de erodir, interferindo sobre a morfologia das ravinas. A variação da coesão, granulometria e infiltração da água no solo, em conjunto com outros parâmetros, determinam diferentes ritmos de erosão nas ravinas em estradas não pavimentadas.

5. MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DE RAVINAS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

5.1. INTRODUÇÃO

A construção e utilização intensa das estradas são os momentos com maior disponibilização de sedimentos sobre a superfície. O tráfego de veículos sobre estradas florestais pode ocasionar aumento significativo do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica, dependendo das condições de conectividade hidrossedimentológica da vertente (BURROUGHS; KING, 1989), modificando também parâmetros físicos do solo, como a condutividade hidráulica saturada (ZIEGLER *et al.*, 2006). As ações antrópicas mais determinantes estão diretamente associadas com a superfície terrestre, como o trânsito de caminhões e tratores (ANDERSON; POTTS, 1987) e arraste dos troncos de árvores, gerando compactação e mistura de solo com subsolo (ZIEGLER *et al.*, 2006).

Práticas conservacionistas podem auxiliar na redução dos processos erosivos intensos, como no caso de ravinas (THOMAZ; ANTONELI, 2008). A construção de drenos nas estradas e manutenção de zonas florestais próximas aos rios podem reduzir o escoamento e a erosão em zonas de extração de troncos (GILMOUR; GILMOUR, 1971). A restauração às condições normais de áreas afetadas por processos erosivos intensos como ravinas e voçorocas é um processo caro (BRUIJNZEEL, 1990), e por isso a determinação da dinâmica hidrogeomorfológica nesses ambientes é importante, pois pode contribuir para a mitigação da erosão sobre vertentes.

O escoamento superficial proveniente da precipitação é responsável pelo transporte das partículas erodidas e produz destacamento do solo, mediante à força cisalhante do deflúvio (SHIELDS, 1936 apud MORGAN, 2005, p.21). O escoamento superficial pode ser classificado em: *i*) hortoniano, característico de áreas compactadas ou com reduzida infiltração, ocorrendo quando a taxa de infiltração no solo não é capaz de absorver todo o volume líquido, gerando acúmulo de água na superfície (HORTON, 1933); e *ii*) dunniano, quando o escoamento subsuperficial aflora em algum ponto da vertente (DUNNE; BLACK, 1970).

O escoamento superficial inicial é difuso (HORTON, 1933) e denominado escoamento laminar (HOGG, 1982), ocorrendo em cursos anastomosados associados à vegetação (GUTIERREZ; HERNANDEZ, 1996; GUERRA, 2007, p.30), provocando erosão laminar. O escoamento pode se concentrar devido às irregularidades da superfície do solo, gerando erosão

e o aparecimento de sulcos que se transformam em ravinas com a intensificação da erosão (VANWALLEGHEM et al., 2005; FRANCISCO, 2011; MARTINS et al., 2017). A erosão é agravada nos solos expostos devido ao efeito *splash*, o qual provoca selagem por desagregação e reordenamento das partículas com a força de impacto da gota de água precipitada (DULEY, 1939; ELLISON, 1945; WISCHMEIER; SMITH, 1978; FERNÁNDEZ-RAGA et al., 2017).

Como resultado da intensificação da erosão, a formação de ravinas implica em aumento da velocidade do escoamento com o aumento da vazão, principalmente nos eventos de precipitação mais intensos. Além da velocidade, outros parâmetros também se alteram com o aumento da vazão, como área e perímetro molhados, raio hidráulico e tensão de cisalhamento (LAFAYETTE; CANTALICE; COUTINHO, 2011). O aumento do raio hidráulico promove o aumento da tensão de cisalhamento, facilitando as transformações na morfologia da ravina através da desagregação do solo (SHIELDS, 1936 apud MORGAN, 2005, p.21; LAFAYETTE; CANTALICE; COUTINHO, 2011).

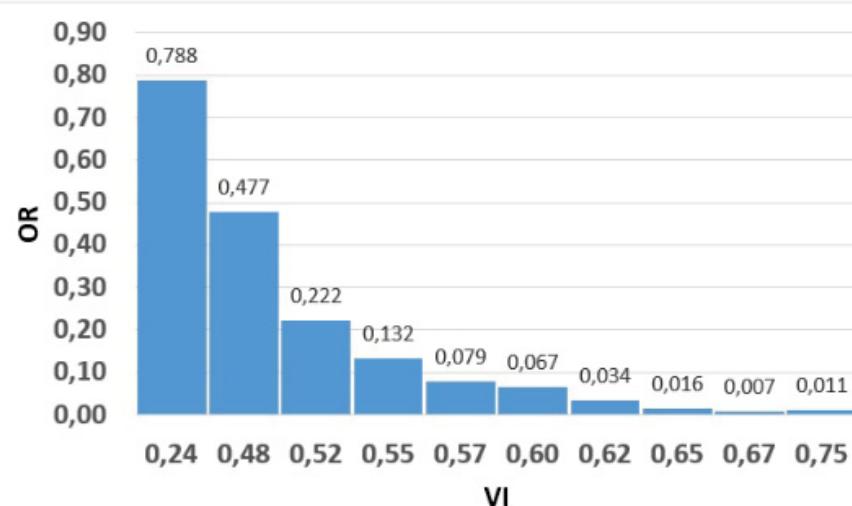
Além do destacamento de partículas pelo deflúvio, existem outras formas de erosão e expansão de ravinas. A retração da cabeceira da ravina, mediante o avanço da feição erosiva à montante da encosta é um fenômeno influenciado por diversos fatores, como a precipitação, área de drenagem (VANMAERCKE et al., 2016), coesão do solo, altura e ângulo de inclinação da vertente, descarga de água e velocidade do escoamento (DE PLOEY, 1989), além de fenômenos como gotejamento, escorregamento, drenagem e desmoronamentos. A retração da cabeceira exerce influência no comprimento e na forma da ravina (VITTE; MELLO, 2007).

A ocorrência e expansão de ravinas são influenciadas por parâmetros como precipitação, formas de relevo, tipo de solo, hidrologia (VITTE; MELLO, 2007), declividade, aparecimento de crostas na superfície, características da área de drenagem, classificação de solo e litologia, ocorrência de *piping*, presença ou ausência de vegetação (FIGURA 15), manejo do solo (VALENTIN; POESEN; LI, 2005) e construção de estradas (BURROUGHS; KING, 1989; MOEYERSONS, 1991; MONTGOMERY, 1994). A vegetação reduz a erosão do solo (KITTREDGE, 1948, p.279; ABRAHAMS; PARSONS; WAINWRIGHT, 1995) causada pelo efeito *splash* e escoamento, por meio da interceptação e aumento da infiltração (BRUIJNZEEL, 1990; KEMPER; MILLER, 1974; UEHARA; JONES, 1974; CARVALHO, 2015).

A presença de vegetação altera a formação ou expansão de ravinas, conforme indica a FIGURA 15. Para índices de vegetação mais elevados, a ocorrência de ravinas é menor, indicando a importância da cobertura vegetal na redução da erosão em sulcos. O aumento da

infiltração e a interceptação também resultam em menor quantidade de água disponível para o escoamento superficial no interior dos sulcos (BRUIJNZEEL, 1990; KEMPER; MILLER, 1974; UEHARA; JONES, 1974; CARVALHO, 2015), diminuindo a erosão das ravinas.

FIGURA 15 - OCORRÊNCIA DE RAVINAS (OR) EM RELAÇÃO AOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (VI), INDICANDO QUE QUANTO MAIOR VI, MENOR É OR



FONTE: FERREIRA et al. (2014)

A altura do escoamento em ravinas, relacionada ao aumento no volume de água, facilita o transporte de sedimentos (JULIEN; SIMONS, 1985; LAFAYETTE; CANTALICE; COUTINHO, 2011). Estruturas podem ser construídas no interior dos sulcos das ravinas lineares para realizar o monitoramento da altura do escoamento, e consequentemente quantificação dos processos erosivos. Calhas em V Thompson com forma geométrica conhecida permitiram cálculo da vazão entre 0,1 e 320 L s⁻¹ em voçorocas de grande porte na Polônia (RODZIK; FURTAK; ZGLOBICKI, 2009). A metodologia é semelhante à instalação de vertedouros e calhas *Parshall* no curso de pequenos rios para a obtenção da vazão, associada com o uso de sensores de nível (SANTOS, 2009).

Nichols et al. (2013) consideraram que são poucos os estudos voltados à quantificação e associação do escoamento superficial e produção de sedimentos em canais de feições erosivas lineares. Para a avaliação do regime pluviométrico em conjunto com o deflúvio, os estudos geralmente utilizam-se de pluviômetros associados a sensores e calhas para medição de escoamento e outros mecanismos hidrológicos (DELONG; JOHNSON; WHIPPLE, 2014).

Dados obtidos no monitoramento de 37 feições erosivas na França, utilizando conjuntos de armadilhas de sedimentos (reservatórios em série inseridos a partir do ponto de descarga de água das feições), evidenciaram a produção de sedimentos anuais entre 0 e 17,2 t ha⁻¹ ano⁻¹. O

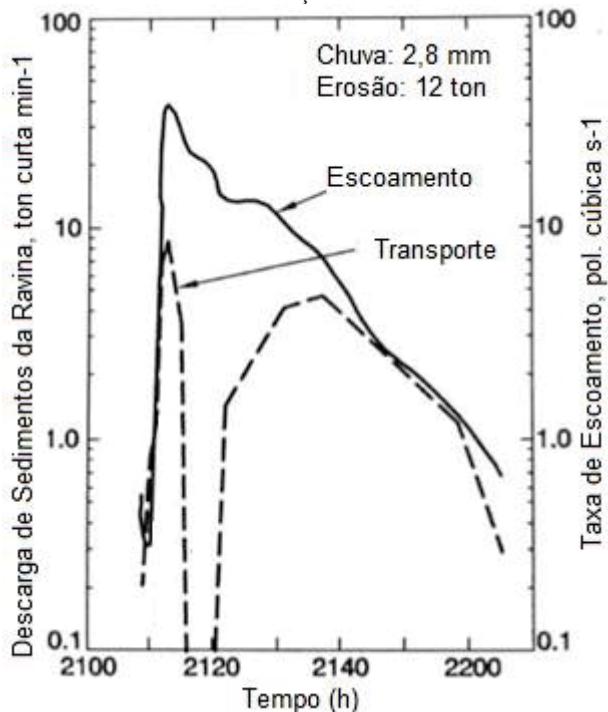
problema constatado com a utilização da técnica de medição foi a superação da capacidade dos instrumentos, responsável pela subestimação dos valores mais altos obtidos na série (REY, 2003).

Grande parte dos trabalhos voltados à medição da produção de sedimentos gerada com o escoamento utilizam coletas manuais de água com sedimentos em intervalos regulares ao longo do processo de escoamento (RODZIK; FURTAK; ZGLOBICKI, 2009; PIEST; BRADFORD; SPOMER, 1975). A quantidade de sedimentos por volume é calculada posteriormente em laboratório, tendo como desvantagem a demora na obtenção dos resultados.

Para a obtenção da quantidade de sedimentos transportados no tempo em um ponto específico, é possível utilizar turbidímetros de modo semelhante às aplicações em rios. A turbidez pode ser relacionada com a concentração de sedimentos, mediante calibrações realizadas em laboratório estabelecendo-se equações de conversão direta entre os dados obtidos e os valores desejados. Os resultados são bons, desde que a carga de sedimentos seja relativamente homogênea e compatível com a calibração (LEWIS, 2003; SANTOS, 2009; SCHULTZ, 2013).

As feições erosivas lineares apresentam interação não linear entre escoamento e produção de sedimentos (FIGURA 15; PIEST, BRADFORD; SPOMER, 1975). Na FIGURA 16 observa-se que o pico de escoamento é acompanhado pelo pico de sedimentos, o qual reduz a zero mesmo com a presença de escoamento na ravina. Essa redução ocorre devido ao transporte inicial do sedimento disponível, seguido do período livre de carga sedimentar, que é substituído posteriormente por uma renovação da disponibilidade de partículas erodidas pela energia fornecida pela precipitação.

FIGURA 16 - HIDROGRAMA E SEDIMENTOGRAMA DE RAVINA MONITORADA, COM DECLÍNIO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E POSTERIOR RETOMADA (EM TORNO DE 2120 h), INDICANDO EXAUSTÃO NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS



FONTE: PEST; BRADFORD; SPOMER (1975).

Variações na erodibilidade de solos como resposta de alterações nas condições de umidade inicial (GOVERS; LOCH, 1993) e alternância entre períodos com e sem precipitação já foram indicadas em alguns estudos (BRYAN, 1996; BRYAN, 2000). Um dos fenômenos envolvidos nas variações é a coerência da estrutura do solo (KWAAD; MUCHER, 1994; BRYAN, 2000), que se restabelece mais rapidamente em eventos de chuva do que nos períodos secos. A formação de crostas na superfície (MCINTYRE, 1958) altera a infiltração de água no solo e favorece o escoamento. A diminuição da resistência do material constituinte do solo afeta a entrega de sedimentos em encostas, devido ao aumento da tensão do ar nos poros, à dilatação diferencial dos componentes do solo e à energia das gotas de água, processos oriundos do umedecimento em solos previamente secos (PANABOKKE; QUIRK, 1957; BRYAN, 2000).

A quantificação dos mecanismos hidrogeomorfológicos possibilita o aprofundamento das análises quanto aos efeitos de ravinas no ambiente, feições erosivas que intensificam a produção e o transporte de sedimentos de modo geral (THOMAZ; ANTONELI, 2008). A intensificação da erosão em estradas em zonas de extração de troncos de árvores de *Pinus* pode levar à formação de ravinas (CROKE; MOCKLER, 2001; CAVICHOLO, 2005; HEEDE, 1975), como no caso das ravinas identificadas em estradas não pavimentadas na bacia

hidrográfica experimental do Rio Saci. Porém, a determinação da dinâmica hidrogeomorfológica dessas feições em estradas é um tema que foi pouco estudado.

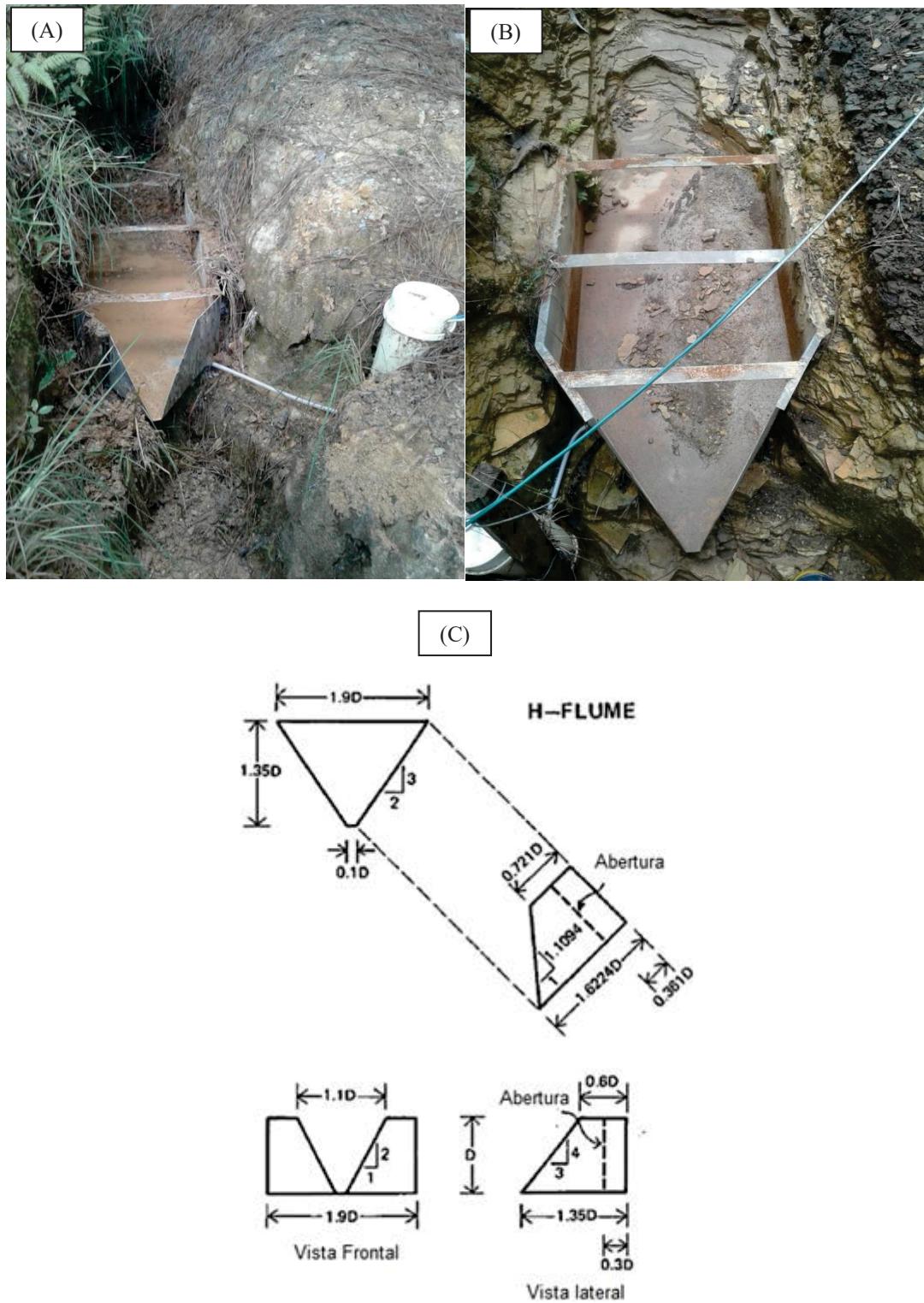
Mediante o contexto apresentado teve-se por objetivo no presente capítulo determinar a dinâmica hidrogeomorfológica de duas ravinas sob eventos pluviométricos, por meio da avaliação da geração de escoamento e produção de sedimentos. A área de estudo são duas estradas não pavimentadas em zonas de povoamento de *Pinus taeda*, na bacia experimental do Rio Saci, em Rio Negrinho/SC.

5.2. MATERIAIS E MÉTODOS

O monitoramento das ravinas foi realizado por eventos, com o apoio do Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG – UFPR), utilizando-se duas calhas H (ou H-flume, como também são conhecidas) instaladas no interior dos sulcos, dispostas para receber todo o escoamento proveniente da área de contribuição à montante (FIGURA 17). A calhas H foram conectadas ao poço de observação por um tubo de diâmetro reduzido. No poço de observação foi instalado o sensor de nível para leitura da altura da lâmina de água do escoamento. Com isso, foi possível obter séries de dados de vazão ($L\ s^{-1}$) simultaneamente nas duas ravinas analisadas.

Os modelos de calhas empregados tiveram 0,15 e 0,23 m de profundidade do canal (FIGURA 17c e 17d), o que equivale às vazões máximas de 9,17 e 26,9 $L\ s^{-1}$ para as Ravinas com *Pinus* e Lindeira, respectivamente (BRAKENSIEK, 1979, p.88-97).

FIGURA 17 - CALHAS H ASSOCIADAS A SENSORES DE NÍVEL (INSTALADOS NO INTERIOR DOS CANOS BRANCOS): (A) RAVINA COM *PINUS*; (B) RAVINA LINDEIRA, E (C) ESQUEMA INDICANDO OS DETALHES CONSIDERADOS NO PROJETO DAS CALHAS H



Fonte: O AUTOR (2019); HOLTAN *et al.* (1962).

A vazão medida na calha H pode ser obtida com a equação 4 (BOS, 1979):

$$\log Q = A + B * \log h_a + C * [\log h_a]^2 \quad (4)$$

Em que: Q é a vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); A, B e C são parâmetros previamente definidos de acordo com as dimensões da calha H; e h_a é a altura da lâmina de água no interior da calha (m).

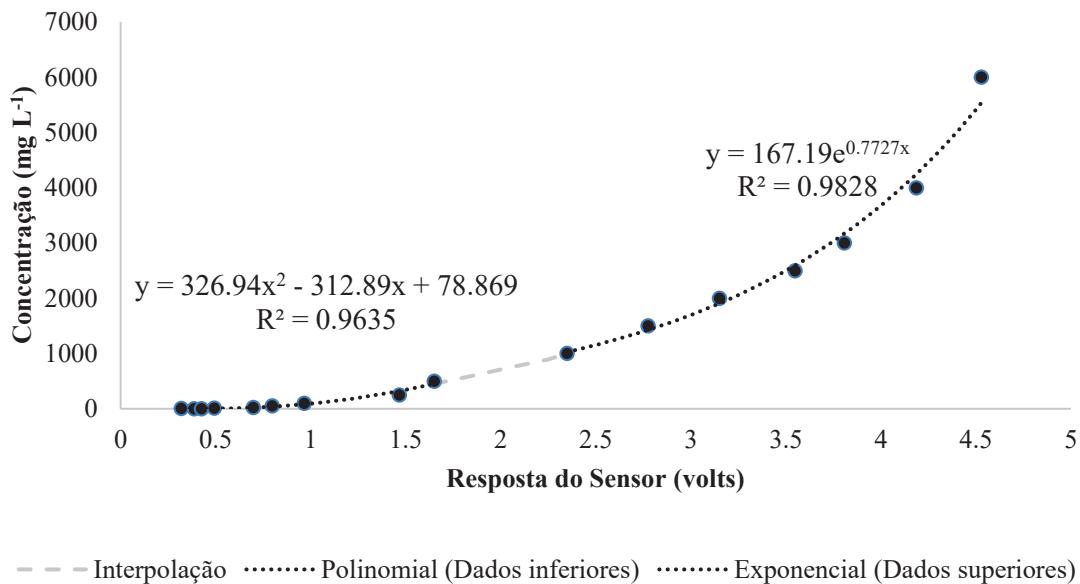
Turbidímetros fabricados pelo LHG foram instalados próximos às calhas no interior das ravinas, para a coleta de dados de turbidez (FIGURA 18). Calibrações dos equipamentos feitas em laboratório (LEWIS, 2003; SANTOS, 2009) permitiram o estabelecimento de equações de transformação dos valores de turbidez (em volts) para produção de sedimentos (g s^{-1}). Os turbidímetros foram construídos no LHG utilizando impressora 3D e materiais de baixo custo, como canos e emissores/receptores de luz acoplados no seu interior (SCHULTZ, 2013).

FIGURA 18 - TURBIDÍMETROS INSTALADOS EM CAMPO NO INTERIOR DAS RAVINAS (A) COM *PINUS* E (B) LINDEIRA, CONECTADOS EM *DATALOGGER* MARCA *WATERLOG*, DISPOSTO EM UM POSTE FIXADO NAS PROXIMIDADES



Foram utilizadas duas equações para a conversão da resposta em *volts* do sensor de turbidez para a concentração (mg L^{-1}), para melhor ajuste da curva aos dados obtidos na calibração (FIGURA 19). Pela proximidade, o valor de 2 *volts* foi definido como limiar para as fórmulas.

FIGURA 19 - RESPOSTA DO SENSOR DE TURBIDEZ (*VOLTS*), MEDIDA COM USO DE *DATALOGGER* MARCA *WATERLOG*, VERSUS CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS OBTIDA ATRAVÉS DE EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO. A UTILIZAÇÃO DE DUAS EQUAÇÕES FOI NECESSÁRIA PARA MELHOR ADERÊNCIA À SÉRIE.



Os sensores foram conectados a *dataloggers* da marca *GlobalWater*, modelo GL500U, instalados no local. A resolução temporal adotada para a leitura foi de 2 minutos, considerado o intervalo máximo adequado para discretização do hidrograma das ravinas e devido à capacidade de armazenamento do *datalogger* necessária para manter o monitoramento ativo no intervalo de visitas a campo. Um pluviômetro da marca *WaterLog*, modelo H-340, instalado na porção mediana entre as duas estradas foi utilizado para a coleta de dados de precipitação (FIGURA 20).

O critério para separação de um evento de precipitação baseou-se em Wischmeier e Smith (1978) e Santos (2009). Assim, dois eventos foram considerados diferentes quando houve intervalo de no mínimo 6 horas e precipitação inferior a 1 mm entre eles.

FIGURA 20 – PLUVIÔMETRO DE BÁSCULA INSTALADO EM CAMPO SOBRE POSTE E PLATAFORMA. O SENSOR ESTÁ CONECTADO A UM DATALOGGER MARCA WATERLOG DISPOSTO NA PORÇÃO INFERIOR



O monitoramento ocorreu no período entre 2017 e 2019, e todos os eventos aproveitáveis que apresentavam resultados consistentes para ao menos uma das ravinas foram considerados nas análises, totalizando 20 eventos.

A caracterização dos eventos foi realizada com os cálculos de intensidade máxima da precipitação em 10 min e 30 min (i_{10} e i_{30}), que representam importantes variáveis que auxiliam na compreensão dos componentes de erosão de bacias hidrográficas de pequeno porte (SANTOS *et al.*, 2018). Para a resposta da bacia, foram calculadas a vazão máxima e produção de sedimentos máxima, parâmetros que auxiliam na caracterização do escoamento e da erosão (WISCHMEIER, 1959). Também foram calculadas a vazão de pico ($L s^{-1}$), precipitação total (mm), escoamento total (mm) e produção de sedimentos total (g).

5.3. RESULTADOS

Os eventos selecionados apresentaram valores de magnitude e intensidade de chuva bastante variados (Tabela 3). Os hidrogramas e sedimentogramas de todos os eventos com séries de escoamento e produção de sedimentos consistentes para cada ravina estão dispostos

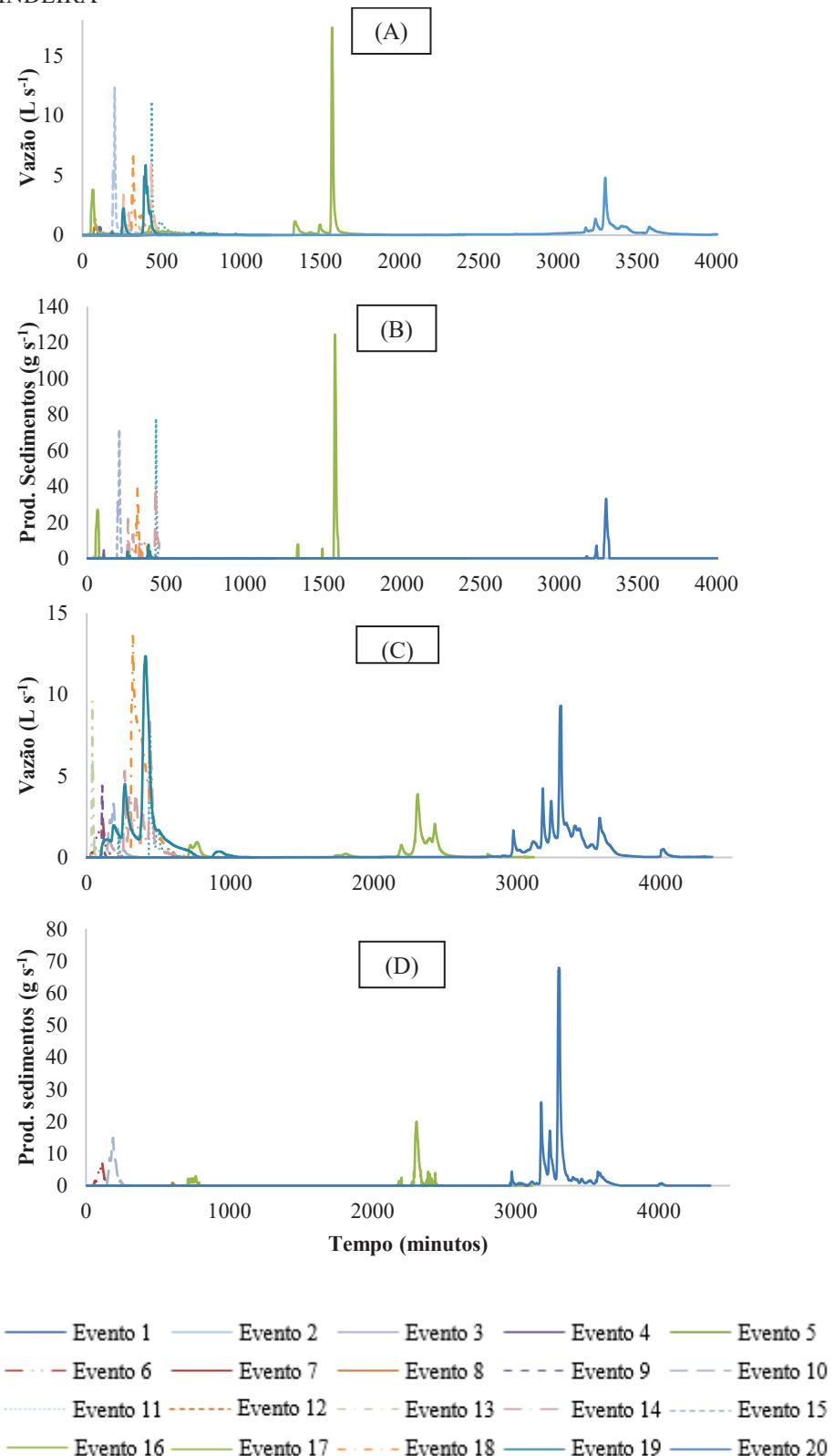
nas FIGURAS 21a a 21d. O Evento 13 é o mais antigo, e foi monitorado em 13 de agosto de 2017. O Evento 4 é o mais recente e foi obtido em 15 de agosto de 2019.

TABELA 3 - EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO SELECIONADOS: MAGNITUDES E RESPECTIVOS I10 E I30, ESCOAMENTO SUPERFICIAL TOTAL (E), VAZÃO MÁXIMA (Q_p), PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS TOTAL (Q_{st}) E PICO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (Q_{sp})

Evento	Data	Magnitude	I10 (mm h ⁻¹)	I30 (mm h ⁻¹)	E (mm)		Q _p (L s ⁻¹)		Q _{st} (kg)		Q _{sp} (g s ⁻¹)	
			RP	RL	RP	RL	RP	RL	RP	RL	RP	RL
1	28/07/2019	0,3	1,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	01/08/2019	0,3	1,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	17/07/2019	0,8	3,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	15/08/2019	1,8	3,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	02/08/2019	3,3	6,1	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	09/10/2017	3,8	4,6	3,6	1,2	2,5	0,5	2,2	1,8	20,0	1,4	8,3
7	30/07/2019	4,6	7,6	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	01/10/2017	10,4	18,3	6,6	—	0,1	—	0,3	—	0,7	—	0,9
9	15/05/2018	11,2	24,4	14,3	0,5	1,5	0,5	4,4	0,7	0,0	3,3	0,0
10	10/10/2017	22,1	15,2	13,2	—	3,7	—	3,3	—	38,5	-	14,9
11	18/05/2018	26,6	43,9	25,2	6,5	8,7	11,2	8,1	47,3	—	63,5	—
12	26/12/2018	29,7	91,4	57,9	0,8	—	1,5	—	0,4	—	0,7	—
13	13/08/2017	41,4	35,1	28,4	0,4	13,5	0,3	9,6	—	—	—	—
14	12/06/2018	44,5	29,1	17,7	5,0	12,1	6,2	8,3	—	—	—	—
15	21/11/2017	54,6	103,6	35,1	3,5	—	12,2	—	48,2	—	71,7	—
16	06/10/2017	58,9	18,3	15,2	—	7,9	—	3,9	—	47,2	—	20,0
17	10/01/2018	86,3	131,9	48,7	19,6	—	17,4	—	230,8	—	107,7	—
18	18/11/2017	89,9	73,1	62,0	13,5	21,5	7,7	13,6	56,7	—	44,0	—
19	22/12/2018	106,7	59,5	40,7	9,2	48,0	5,9	12,4	8,8	—	8,1	—
20	29/09/2017	113,3	30,5	21,3	27,3	18,8	4,8	9,3	36,4	180,6	27,2	54,1

Onde: E é escoamento total, Q_p é pico de vazão, Q_{st} é produção de sedimentos total, Q_{sp} é pico de produção de sedimentos, RP é ravina com *Pinus* e RL é ravina Lindeira. As células com traço indicam erros no monitoramento.

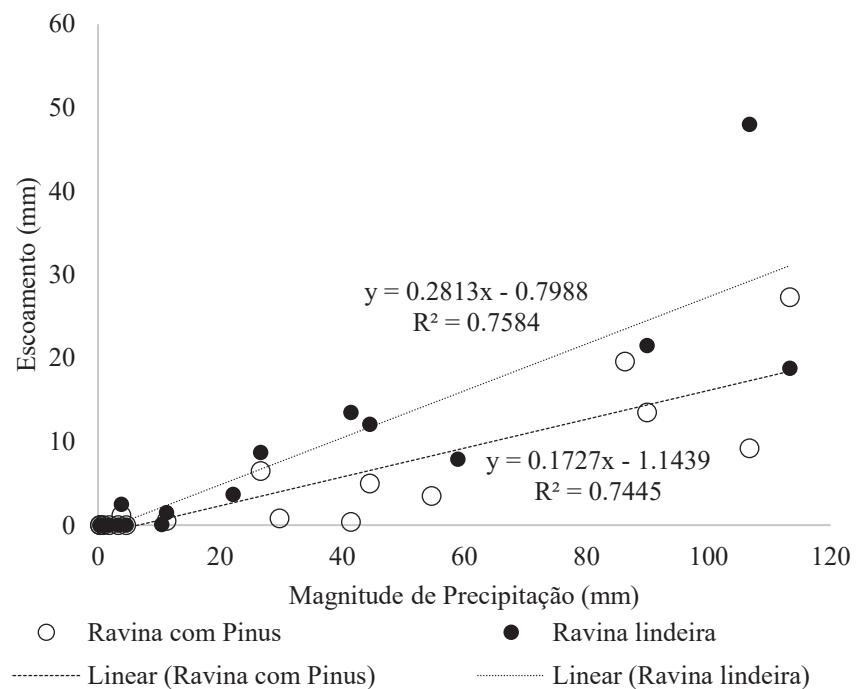
FIGURA 21 - GRÁFICOS DE TODOS OS EVENTOS SELECIONADOS INDICANDO: (A) VAZÃO NA RAVINA COM PINUS, (B) PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA RAVINA COM PINUS, (C) VAZÃO NA RAVINA LINDEIRA, E (D) PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA RAVINA LINDEIRA



As vazões máximas não estão diretamente relacionadas com o escoamento superficial total. O maior pico de vazão para a Ravina com *Pinus* está presente no Evento 17 ($17,4 \text{ L s}^{-1}$), enquanto no Evento 20 (com maior escoamento superficial) é três vezes menor ($4,8 \text{ L s}^{-1}$). O maior pico de vazão na Ravina Lindeira ocorreu no Evento 18 ($13,6 \text{ L s}^{-1}$), mas o maior escoamento superficial total foi do Evento 19 ($12,4 \text{ L s}^{-1}$).

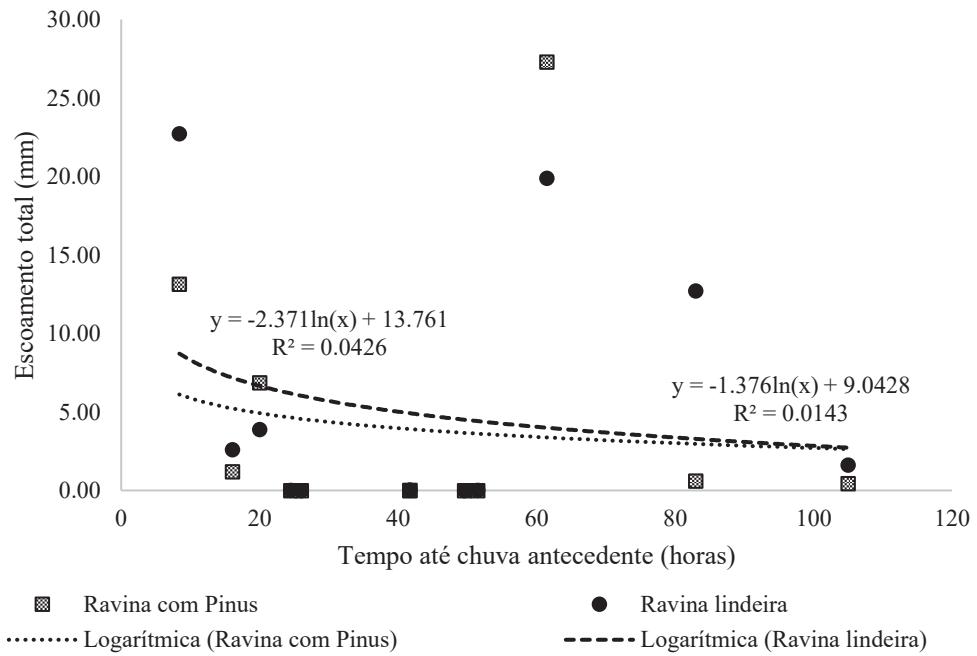
Houve tendência de eventos com elevado escoamento superficial total serem gerados por precipitações de grande magnitude (FIGURA 22), com valores R^2 de 0,74 e 0,75 para as Ravinas com *Pinus* e Lindeira, respectivamente.

FIGURA 22 - ESCOAMENTO MONITORADO TOTAL VERSUS MAGNITUDE DE PRECIPITAÇÃO



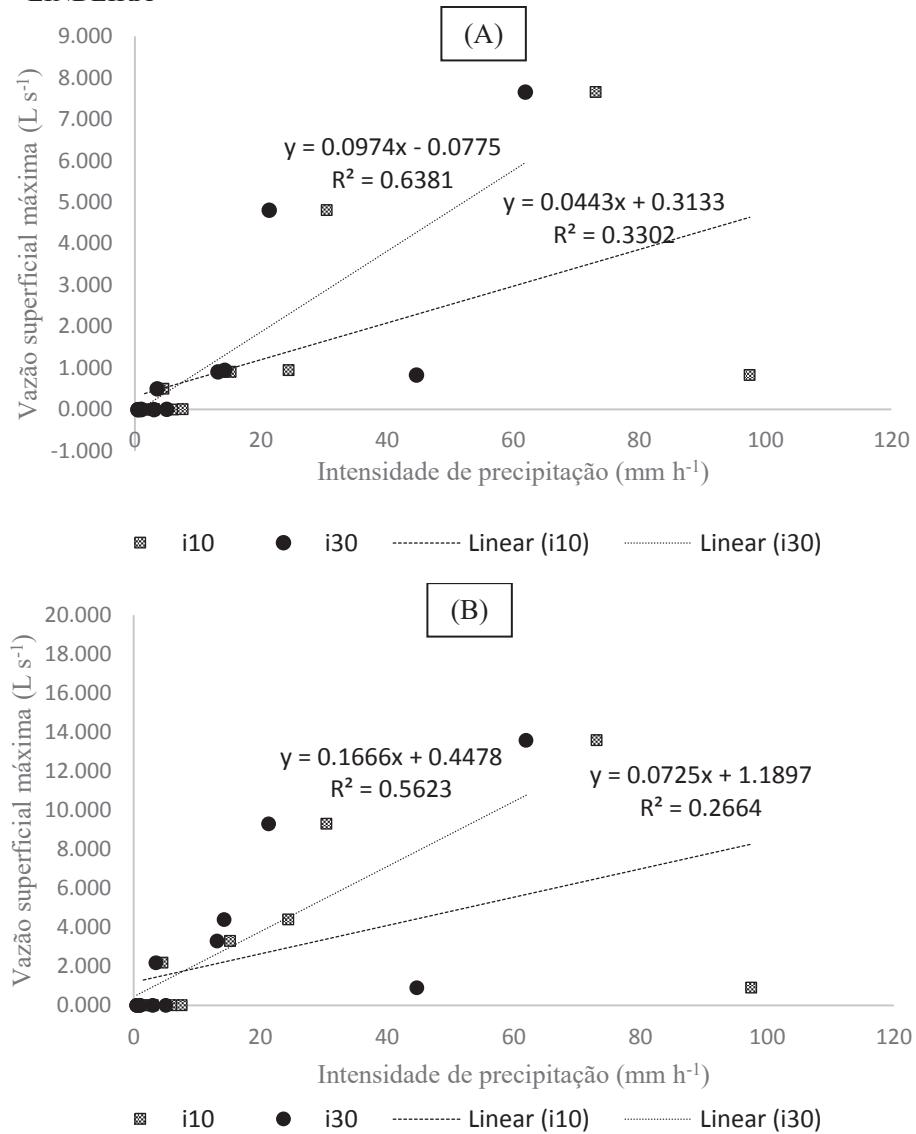
A relação entre os períodos que marcam o tempo entre o início dos eventos analisados no presente trabalho e o fim dos eventos imediatamente anteriores na série pluviométrica foram plotados juntamente com o escoamento total correspondente (FIGURA 23). Não houve relação direta entre as variáveis.

FIGURA 23 - TEMPO ATÉ PRECIPITAÇÃO ANTECEDENTE VERSUS ESCOAMENTO TOTAL



Na FIGURA 24 tem-se a intensidade i10 e i30 máximas para a precipitação versus a vazão superficial máxima nas Ravinas com *Pinus* e Lindeira. Apesar dos baixos R^2 (0,63 de i10 e 0,23 de i30 com vazão superficial máxima para a Ravina com *Pinus*, e 0,56 de i10 e 0,26 de i30 com vazão superficial máxima para a Ravina Lindeira), alguns pontos indicam boa associação entre os maiores valores de intensidade máxima de precipitação e maiores valores de vazão superficial máxima. Mesmo em eventos com alta intensidade máxima de precipitação, dependendo do tempo com que a intensidade permanece elevada, quantidade maior ou menor de escoamento pode ser gerada na vertente, indicando a necessidade de considerar a intensidade da chuva em associação com o tempo de duração do evento. Geralmente, os eventos com vazão máxima mais elevada são os que adquirem maiores acumulados de produção de sedimentos.

FIGURA 24 - I10 E I30 MÁXIMAS VERSUS VAZÃO SUPERFICIAL MÁXIMA NOS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO MONITORADOS PARA: (A) RAVINA COM PINUS E (B) RAVINA LINDEIRA



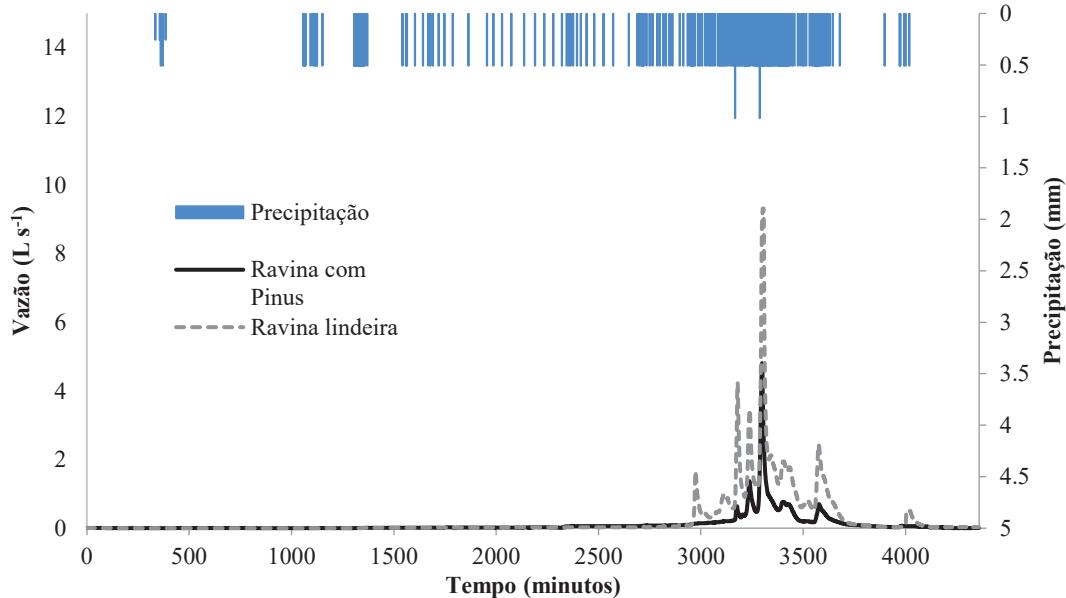
Os valores de i10 e i30 máximos podem apresentar grandes diferenças. As i10 geralmente são maiores, mas os resultados de i30 possibilitam melhor visualização da tendência da distribuição dos pontos no gráfico, pois caracterizam melhor a série de dados por empregar intervalos maiores de tempo.

Intensidades semelhantes de precipitação produzem efeitos significativamente diferentes na vazão superficial das ravinas, devido às condições de precipitação diferenciadas entre os eventos que não são consideradas no cálculo de intensidade, como a magnitude total e a dinâmica do restante da série além do período de pico de escoamento. Apesar das diferenças entre eventos, as duas ravinas apresentaram a maior parte das vazões superficiais máximas situando-se abaixo de $10\ L\ s^{-1}$ e valores próximos para o mesmo evento entre si.

O Evento 20 apresentou a maior precipitação registrada, mas a intensidade ficou intermediária entre os eventos de precipitação selecionados. Os Eventos 1 e 2 apresentaram as menores magnitudes. Os eventos de precipitação pluviométrica analisados tiveram ampla variabilidade de intensidades i_{10} e i_{30} , com valores entre $1,5 \text{ mm h}^{-1}$ (Evento 1) e $131,9 \text{ mm h}^{-1}$ (Evento 17).¹

Os montantes de escoamento superficial provenientes da Ravina Lindeira geralmente foram superiores aos totais da Ravina com *Pinus*. O Evento 20 ($P = 113,28 \text{ mm}$) apresentou a maior quantidade de escoamento superficial na Ravina com *Pinus* ($27,3 \text{ mm}$; 24%), um pouco mais que o verificado na Ravina Lindeira ($18,8 \text{ mm}$; 18%). Como o cálculo do escoamento superficial considera a área de contribuição do ponto monitorado, a vazão na Ravina Lindeira foi maior do que na Ravina com *Pinus* para o Evento 20 (FIGURA 25).

FIGURA 25 - HIDROGRAMA DAS RAVINAS PARA O EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 20

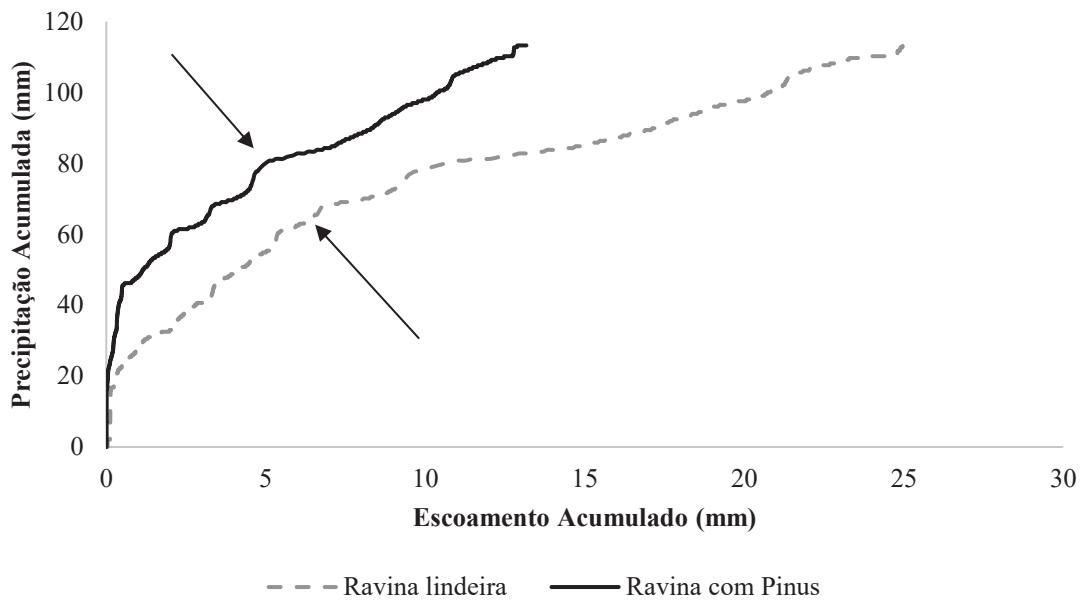


A vazão máxima do Evento 20 foi elevada na Ravina Lindeira, em que se identificou respostas mais expressivas antes e depois do pico máximo de vazão. O escoamento da Ravina com *Pinus* apresentou vazão quase sempre menor do que as da Ravina Lindeira.

A comparação entre precipitação e deflúvio acumulados do Evento 20 possibilitaram identificar aspectos semelhantes entre as ravinas, principalmente a existência de um período inicial com pouco escoamento e duas tendências principais: *i*) a primeira tendência com curva mais íngreme, quando chove mais e escoa menos; e, *ii*) a segunda com inclinação mais leve, em que menor quantidade de chuva produziu mais escoamento para as ravinas (FIGURA 26). A tendência está associada à intensidade da chuva e conexão entre as porções à montante das

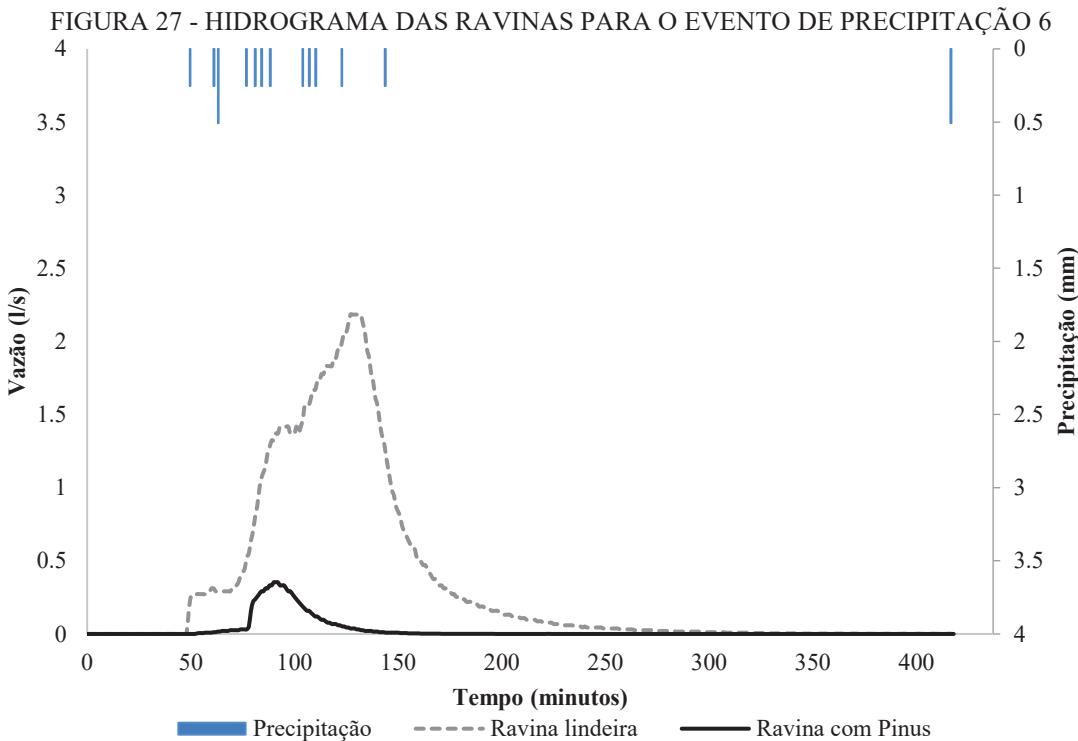
depressões com o restante das ravinas à jusante, dependendo do preenchimento com água. Assim, dependendo do volume inicial de chuva as depressões transbordam mais rapidamente, permitindo a passagem do escoamento.

FIGURA 26 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA VERSUS ESCOAMENTO ACUMULADO PROPORCIONADO PELO EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 20. OS MOMENTOS DE TRANSIÇÃO ENTRE AS TENDÊNCIAS ESTÃO INDICADOS POR SETAS



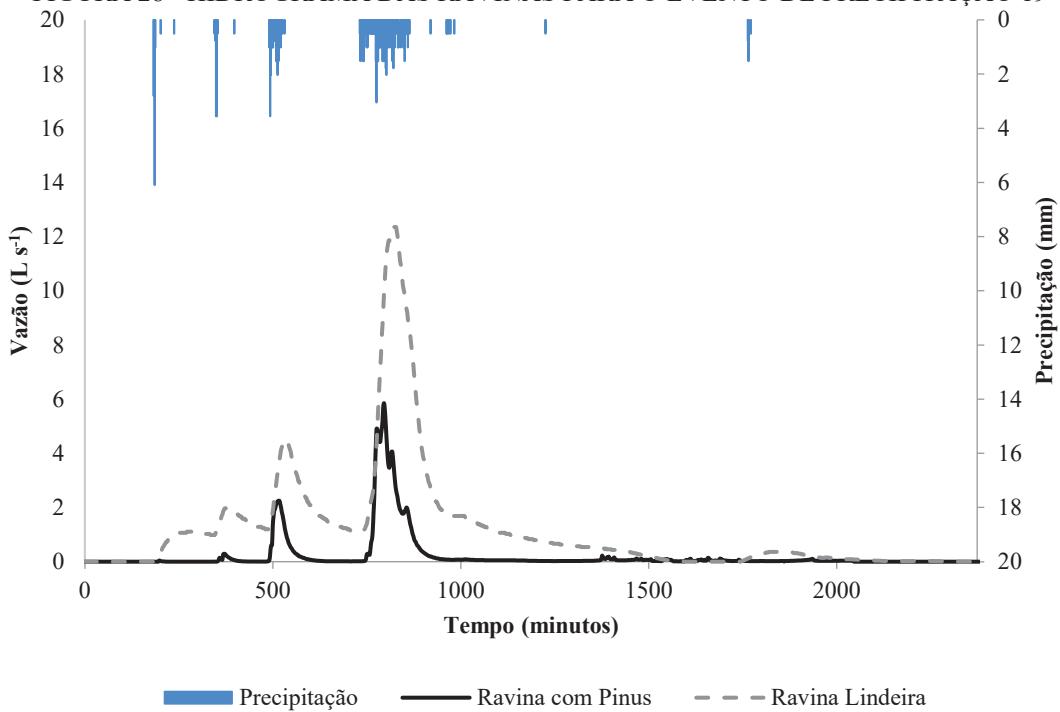
Eventos semelhantes de escoamento total para a Ravina Lindeira foram produzidos por chuvas bastante diferentes. Os Eventos 18 e 20 apresentaram precipitações de 89,9 e 113,3 mm, respectivamente, contudo as intensidades i10 e i30 do Evento 18 foram muito maiores. Houve também eventos semelhantes entre magnitudes das chuvas (Eventos 6 e 7), com 3,8 e 4,6 mm, respectivamente, que produziram escoamentos superficiais totais bem diferenciados. O Evento 7 não produziu escoamento, provavelmente devido à vegetação que se desenvolveu em ambas as estradas no período entre os Eventos 6 e 7, e devido também às condições de umidade antecedente do solo. O Evento 6 forneceu escoamento mais expressivo (FIGURA 27).

A Ravina Lindeira apresentou a série de vazão com valores superiores em relação à Ravina com *Pinus*, a qual diminuiu antecipadamente, mas com um declínio semelhante. Para nenhuma das ravinas foi produzido escoamento com pequena quantidade de chuva, ocorrida algumas horas após o término do pico máximo de escoamento.



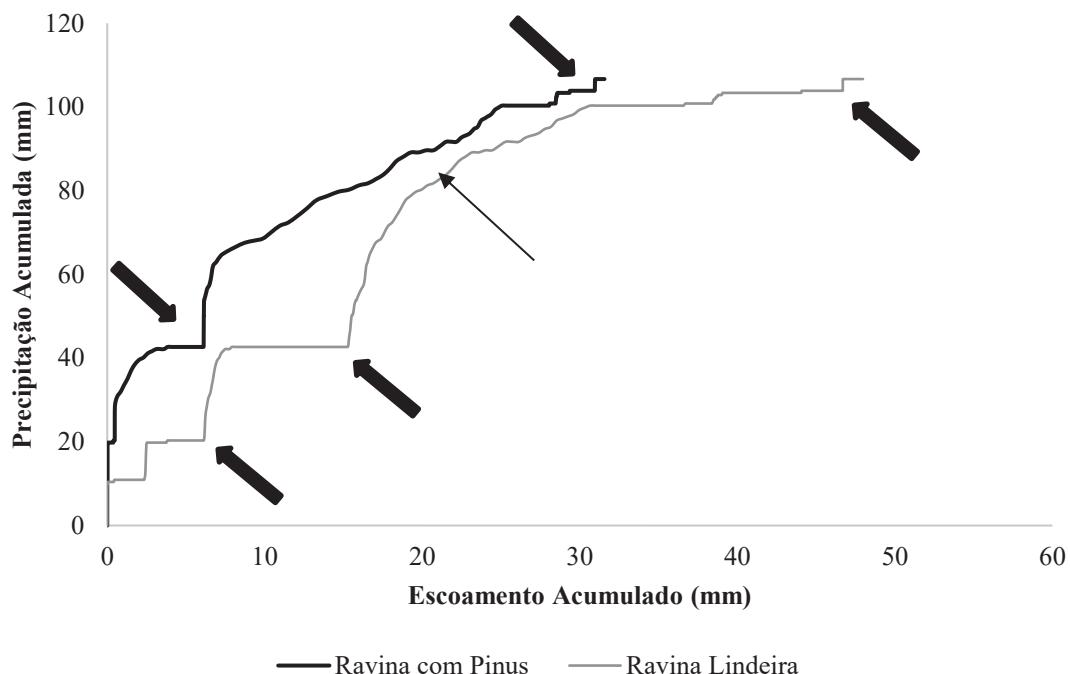
O Evento 19 apresentou escoamento bem consistente para ambas as ravinas, com os picos de vazão chegando a $5,9 \text{ L s}^{-1}$ e $12,4 \text{ L s}^{-1}$ ao mesmo tempo, para o escoamento total de 9,2 mm e 48 mm para as ravinas com *Pinus* e Lindeira, respectivamente. Os resultados confirmam a tendência de outros eventos analisados, em que a Ravina Lindeira produziu mais escoamento que a Ravina com *Pinus*. A tendência das séries é aproximada, com quatro picos principais que aumentam de magnitude seguindo os picos de precipitação (FIGURA 28). O Evento 19 de precipitação (106,7 mm) promoveu o maior escoamento superficial (48,0 mm; 47% do total) na Ravina Lindeira, e 9,2 mm (8,6% do total) de escoamento na Ravina com *Pinus*.

FIGURA 28 - HIDROGRAMA DAS RAVINAS PARA O EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 19



A curva acumulada de escoamento em função da precipitação acumulada do Evento 19 também produziu duas tendências na Ravina Lindeira, mas declivosa no início e menos íngreme posteriormente. Também é possível identificar aumento da precipitação sem aumento do escoamento, refletindo a combinação entre intensidade, infiltração e controle realizado pelas depressões ao longo do canal das ravinas (FIGURA 29).

FIGURA 29 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA VERSUS ESCOAMENTO ACUMULADO PROPORCIONADO PELO EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 19, COM DESTAQUE PARA AS DUAS TENDÊNCIAS PRINCIPAIS DAS SÉRIES. A TRANSIÇÃO DA TENDÊNCIA DA SÉRIE É INDICADA POR UMA SETA PRETA FINA, ENQUANTO PORÇÕES ONDE OCORRE AUMENTO DE PRECIPITAÇÃO SEM AUMENTO DE ESCOAMENTO SÃO INDICADAS POR SETAS PRETAS LARGAS.



A produção de sedimentos apresentou padrão semelhante à dinâmica do escoamento, uma vez que é resultado da multiplicação entre a concentração de sedimentos (mg l^{-1}) e a vazão superficial (L s^{-1}). Na Ravina com *Pinus*, a produção de sedimentos foi inferior, com valores muito baixos para alguns eventos de precipitação. Na Ravina Lindeira, a produção de sedimentos foi mais intensa, com pico máximo ultrapassando 50 g s^{-1} .

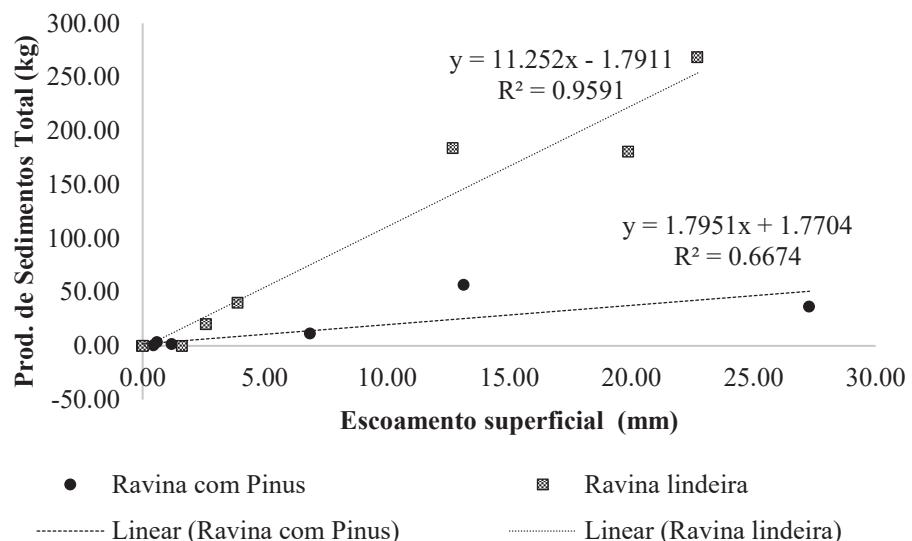
Alguns eventos produziram sedimentos com totais bastante diferenciados entre as ravinas. No Evento 6 verificou-se 1,8 kg (Ravina com *Pinus*) e 20,0 kg (Ravina Lindeira), e no Evento 20, 36,4 kg (Ravina com *Pinus*) e 180,6 kg (Ravina Lindeira). Ao mesmo tempo, eventos com precipitação pluviométrica semelhantes não apresentaram produção de sedimentos próximas na mesma ravina, como foi o caso dos Eventos 11 ($P = 26,6 \text{ mm}$; 47,3 kg de sedimentos) e 12 ($P = 29,7 \text{ mm}$; 0,4 kg de sedimentos) para a Ravina com *Pinus*. Os motivos são diversos, pois teve-se o crescimento da vegetação no entorno da ravina da estrada ao longo de sete meses, mudança de estação do inverno para o verão e modificações na dinâmica interna da feição erosiva.

Eventos de precipitação com resultados de produção de sedimentos semelhantes também foram verificados na Ravina Lindeira, como os Eventos 10 ($P = 22,1 \text{ mm}$; 38,5 kg de

sedimentos) e 16 ($P = 58,9$ mm; 47,2 kg de sedimentos). Os valores de i10 e i30 foram menores no Evento 10.

Na FIGURA 30 tem-se as relações diretas entre escoamento e produção de sedimentos, e a tendência foi bem distinta entre as ravinas monitoradas. A relação entre elevado escoamento superficial e altos montantes de produção de sedimentos total é influenciada pelo tempo dos eventos. A erosão e o transporte de sedimentos dependem de condições específicas, como velocidade de escoamento mínima que dita a tensão de cisalhamento necessária para provocar a erosão, e energia mínima de escoamento para o transporte de partículas à jusante.

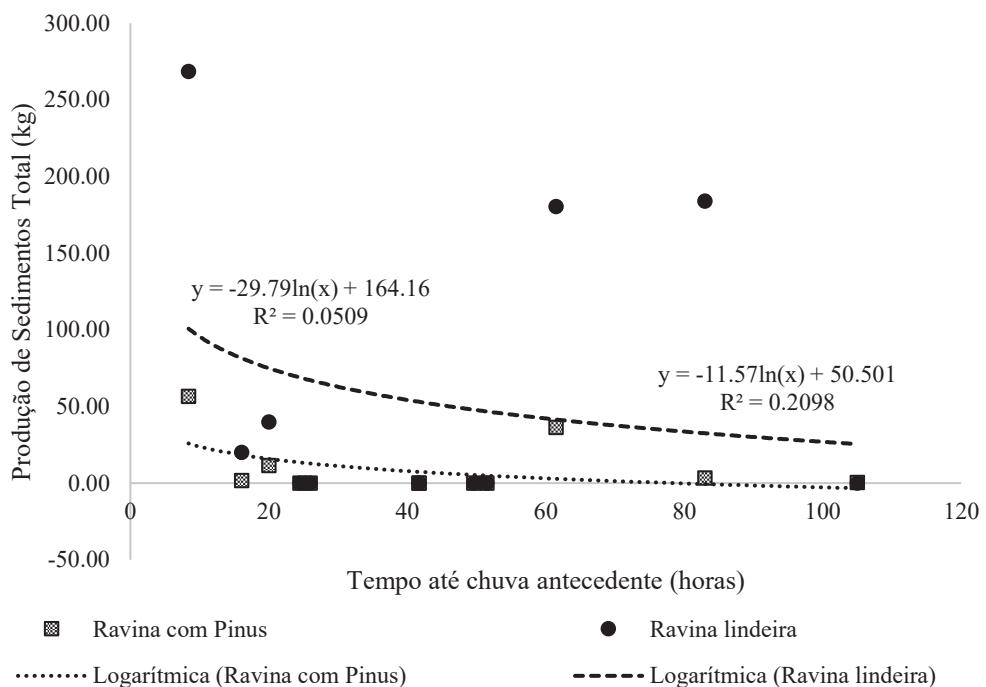
FIGURA 30. ESCOAMENTO SUPERFICIAL VERSUS PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS TOTAL



A relação entre valores máximos de escoamento superficial e o total de produção de sedimentos é bem diferenciada, pois na Ravina Lindeira, a produção de sedimentos foi muitas vezes maior que a verificada na Ravina com *Pinus* para a maioria dos eventos.

A produção de sedimentos total *versus* o tempo até a chuva antecedente não apresentou valor R^2 elevado (0,05 e 0,20 para as Ravinas com *Pinus* e Lindeira, respectivamente), indicando ausência de relação entre umidade inicial do solo e erosão (FIGURA 31).

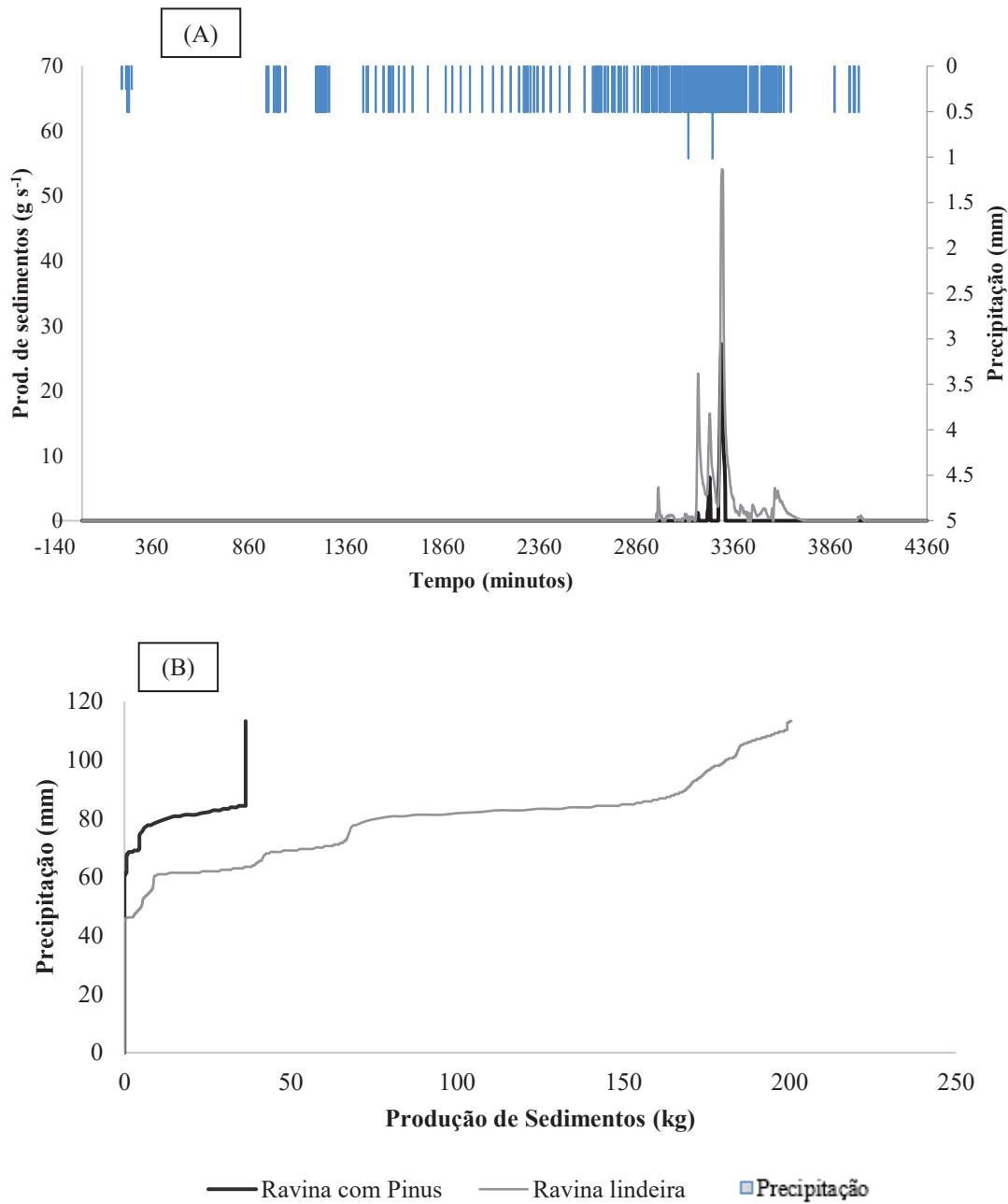
FIGURA 31 - TEMPO ATÉ PRECIPITAÇÃO ANTECEDENTE VERSUS PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS TOTAL PARA OS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO MONITORADOS. NÃO FOI IDENTIFICADA RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS



A produção de sedimentos foi maior nos eventos com maior escoamento, ou seja, elevados acúmulos de escoamento produzem e transportam grandes quantidades de sedimentos (Evento 20; FIGURA 32a). Na FIGURA 32b, temos a relação entre a precipitação acumulada e a produção de sedimentos acumulada.

A produção de sedimentos acumulada em relação à precipitação acumulada indicou os períodos de acúmulo de precipitação sem o aumento da produção de sedimentos, principalmente na Ravina com *Pinus*. Na produção de sedimentos notou-se a tendência principal, e pequenos incrementos ocorrendo devido à intensificação da chuva (FIGURA 32b). O resultado indicou que os sedimentos desagregados encosta acima podem não ser transportados diretamente para fora da ravina, mesmo ocorrendo escoamento.

FIGURA 32 – (A) SEDIMENTOGRAMA DAS RAVINAS E (B) PRECIPITAÇÃO ACUMULADA *VERSUS* PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS ACUMULADA PARA O EVENTO DE PRECIPITAÇÃO 20



5.4. DISCUSSÃO

Segundo Schultz (2017), as ravinas do presente estudo não são contínuas, ou seja, não apresentam conexão direta com qualquer rede hidrográfica local, principalmente devido às barreiras impostas pela vegetação. Em trabalhos de campo foi possível identificar que os sedimentos produzidos se depositam pouco à jusante dos pontos de monitoramento, onde o terreno é plano e coberto com vegetação, e as ravinas desaparecem.

Na Ravina com *Pinus*, a vegetação foi importante na interceptação da precipitação, reduzindo o escoamento, além de fornecer camada de serapilheira que diminuiu o impacto das gotas de chuva. Segundo Bruijnzeel (1990), a vegetação também armazena umidade proveniente da precipitação.

De acordo com Ziegler *et al.* (2006), com vegetação a capacidade de infiltração do solo é alterada, uma vez que o impacto das gotas de chuva é reduzido, dificultando a formação de crosta superficial que diminui a porosidade da camada superior do solo, aumentando a infiltração e reduzindo a formação do escoamento superficial (KEMPER; MILLER, 1974; UEHARA; JONES, 1974; CARVALHO, 2015).

Segundo Bosch e Hewlett (1982), uma plantação de coníferas pode alterar em 40 mm o escoamento com a modificação de 10% em sua cobertura florestal inicial, enquanto plantas rasteiras podem fornecer mudança de 10 mm nas mesmas condições. Logo, a manutenção de plantas na superfície da vertente pode reduzir as taxas de escoamento, e consequentemente o desmatamento pode incrementá-las. As mudanças são maiores em ambientes com alta pluviosidade (BOSCH, HEWLETT, 1982; BOSCH, 1979; GUZHA *et al.*, 2018).

Os motivos da alta vazão superficial da Ravina Lindeira são vários, destacando-se o volume e tamanho da área de contribuição, bem como a presença de solo exposto. A Ravina Lindeira apresentou cobertura baixa de vegetação esparsa composta de gramíneas. O crescimento da vegetação no interior da ravina é fundamental para a sua estabilização (REY, 2003). Ao contrário da Ravina com *Pinus*, pouca vegetação foi observada no interior da Ravina Lindeira.

Considerando o ambiente alterado que caracteriza a Ravina Lindeira, pode-se supor que o fenômeno determinante para a geração de escoamento é o excesso de infiltração. O desmatamento, com solo exposto à compactação pelo trânsito de veículos de carga, gera diminuição da capacidade de infiltração do solo, agravada pela erosão do efeito *splash* (DULEY, 1939; WISCHMEIER; SMITH, 1978), promovendo escoamento hortoniano (HORTON, 1933; FERNÁNDEZ-RAGA *et al.*, 2017).

O escoamento hortoniano indica elevada influência da umidade inicial do solo para a geração de escoamento, mas a metodologia empregada na presente pesquisa não possibilitou observar esse fenômeno. A umidade inicial do solo ou umidade antecedente influencia a disponibilidade de água na superfície (ELLISON, 1945; HORTON, 1945). Quanto maior a umidade inicial do solo no início do evento, menor é a quantidade de água que infiltra no solo, e o volume de água que fica disponível para o escoamento superficial é maior, considerando o

escoamento hortoniano predominante em áreas de baixa infiltração. Nesse sentido, a ocorrência de eventos de precipitação anteriores a uma chuva específica pode influenciar as características da mesma (BRUIJNZEEL, 1990). Esse aspecto não foi verificado nas FIGURAS 23 e 31, em que o coeficiente de determinação obtido (R^2) foi reduzido nas ravinas analisadas (todos R^2 inferiores a 0,2).

Portocarrero, Andrade e Campos (2017) descrevem que a ausência de relação entre o escoamento total e a intensidade da chuva levou à consideração do tempo entre o início da precipitação e início do escoamento. Os autores concluíram que são mais dependentes da umidade inicial os mecanismos cujos padrões espaciais de ocorrência sejam determinados pela quantidade de água nas camadas iniciais (CASTILLO *et al.*, 2003).

Maior umidade inicial do solo também já foi correlacionada com maiores taxas de erosão pluvial devido ao aumento do escoamento superficial e diminuição da resistência dos sedimentos à ação erosiva da precipitação (LUK, 1985).

A precipitação intensa, por outro lado, proporciona abrupto aumento de vazão, promovendo o transporte de grande quantidade de material proveniente da erosão interna ou de fontes externas (como no Evento 20). Essa dinâmica também influencia na granulometria do material transportado (ALVES, 2007).

A maior produção de sedimentos em feições erosivas lineares ocorre em eventos de precipitação com chuvas concentradas e intensas, que induzem grandes alterações na morfologia das feições, conforme indicam estudos com monitoramento de escoamento por calhas e estimativas de erosão por fotos em campo (Nichols *et al.*, 2016).

Avaliando o transporte de sedimentos das porções mais altas das estradas, próximas aos divisores d'água, para as partes inferiores da vertente, onde se localizam os pontos de monitoramento, estima-se que ocorre entrega de sedimentos apenas com eventos de grandes proporções. Eventos menores transportam sedimentos que se depositam nas porções intermediárias das ravinas, devido à rugosidade elevada do leito. Também exerce influência sobre essa dinâmica o tamanho dos aglomerados que se depositam no leito das ravinas por meio de desabamentos de paredes, que não são facilmente desagregados e transportados por eventos menores, principalmente devido à redução de energia imposta pelas depressões. O intervalo de tempo em que os sedimentos podem ficar em zonas de deposição pode variar muito, uma vez que a erosão é capaz de modificar as características físicas dos sedimentos ao longo da descida pela encosta (DIETRICH; DUNNE, 1978).

Devido à deposição de sedimentos em diferentes pontos das ravinas e das diferenças de tempo de armazenamento desses depósitos, não é possível determinar a relação direta entre erosão e produção de sedimentos para as ravinas consideradas (FIGURA 33). A saída dos sedimentos da área de contribuição delimitada pelos barrancos das estradas vai depender de fatores como a dinâmica dos depósitos sedimentares e o tamanho da bacia hidrográfica (TRIMBLE, 1981).

King (1979) associou a intensificação da erosão com feições erosivas lineares, corroborando os resultados do presente trabalho. O autor instalou monitoramento nas estradas baseado em totais acumulados, construindo reservatórios de água e sedimentos nas porções mais baixas das encostas.

Alves (2007) monitorando uma voçoroca em Uberlândia, Minas Gerais, obtiveram vazão entre 1 e 7 L s⁻¹. As voçorocas podem possuir dinâmica erosiva diferenciada devido à presença de afloramento do nível freático, o que não ocorre com as ravinas.

As grandes depressões (*plunge pools*) consomem fração da energia do escoamento (FIGURA 33), atrasando a água nos acúmulos por determinado período, mas intensificam a desagregação de sedimentos com a queda (ZHANG *et al.*, 2018). Nesse sentido, o escoamento que chega nas porções mais baixas e, consequentemente, no ponto de monitoramento da vazão e produção de sedimentos durante o início dos eventos dprecipitação não corresponde ao escoamento proveniente das porções mais altas, mas é a contribuição apenas da porção inferior do interior do canal e porções laterais da ravina.

FIGURA 33 – (A) AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS DE SOLO DEPOSITADOS NO FUNDO DO CANAL DA RAVINA E (B) DEPRESSÃO COM ARMAZENAMENTO DE ÁGUA E SEDIMENTOS NA RAVINA LINDEIRA. AS DEPRESSÕES ARMAZENAM ÁGUA E SEDIMENTOS QUE PODEM SER TRANSPORTADOS EM EVENTOS POSTERIORES



Pequenas alterações na declividade das ravinias analisadas determinaram mudanças na sua morfometria, e a combinação entre declividade e área de drenagem, associada com as características físicas do solo, definiu as larguras e profundidades (conforme comentado nos resultados do Capítulo 1). Observou-se que a resposta hidrossedimentológica das ravinias nos eventos de precipitação tem influência da morfometria e da vegetação das ravinias, o que determina as taxas de vazão e de produção de sedimentos, afetando consequentemente a expansão das dimensões das feições no tempo.

A Ravina Lindeira possui dinâmica erosiva mais ativa, perceptível pelos montantes erodidos em cada evento analisado. Contudo, a Ravina com *Pinus* também apresentou erosão intensa, mesmo com a presença do povoamento do *Pinus*, em que algumas árvores estão sendo gradativamente “engolidas” pela expansão lateral da ravina (FIGURA 34).

FIGURA 34 – ÁRVORES DE *PINUS* SENDO GRADATIVAMENTE “ENGOLIDAS” PELA EXPANSÃO DA LARGURA DA RAVINA



Avaliando os resultados obtidos, considera-se que o monitoramento conseguiu atingir os objetivos de mensurar consistentemente a vazão e a produção de sedimentos, apesar de apresentar diversos problemas ao longo do período de medição, como assoreamento das calhas, fim da vida útil dos sensores, descarregamento das baterias, invasão por insetos, rompimento de cabos de energia e destruição da estrutura de instalação dos equipamentos devido às chuvas intensas, o que comprometeu parte importante da série de dados.

No caso da instalação de calhas H, como ocorrido no experimento, é indicada a manutenção constante da instalação e a utilização de equipamentos que suportem adequadamente as condições previstas de escoamento e erosão para as feições erosivas estudadas, buscando evitar erros e subdimensionamento. Uma ressalva deve ser feita quanto à vazão máxima atingida pela feição monitorada, a qual deve ser considerada no projeto da calha H a ser instalada. Destaca-se que nessas condições experimentais de elevado transporte de sedimentos, o formato autolimpante da calha H minimiza o trabalho de manutenção e a frequência do trabalho de campo.

5.5. CONCLUSÕES

A Ravina Lindeira proporcionou maior escoamento superficial e produção de sedimentos que a Ravina com *Pinus*. A resposta das ravinas frente aos eventos de precipitação pluviométrica depende da morfometria e condições do solo e da superfície das feições, como: área de contribuição, declividade, largura e profundidade, coesão, granulometria, infiltração no solo e presença da vegetação.

A vazão e produção de sedimentos geralmente aumentam com a magnitude e intensidade da chuva, indicando a influência da precipitação sobre a erosão das ravinas. Porém, existem exceções e diferentes regimes pluviométricos podem gerar resultados de escoamento e sedimentos semelhantes para a mesma ravina.

Precipitações pluviométricas com magnitude muito baixa (< 3 mm) não produzem escoamento superficial significativo no ponto de monitoramento nas ravinas. Isso está relacionado com a infiltração da água ao longo das ravinas, principalmente nas depressões, apesar de não ter sido encontrada relação direta entre umidade do solo e geração de escoamento ou produção de sedimentos através do método utilizado.

A produção de sedimentos nas ravinas aumenta com o escoamento ($R^2 = 0,95$ e $0,66$ para as Ravinas Lindeira e com *Pinus*, respectivamente). Apesar disso, as depressões que se desenvolveram no interior das ravinas atrasam o escoamento e a entrega de sedimentos à jusante, atuando como barreiras e reservatórios de água. As depressões interferem nos hidrogramas gerados nos eventos de precipitação, determinando duas inclinações principais das curvas de vazão: a primeira menos sensível à precipitação, e a segunda com maior geração de escoamento em relação à precipitação.

6. SIMULAÇÃO DA DINÂMICA EROSIVA DE RAVINAS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

6.1. INTRODUÇÃO

As características do meio ambiente se modificam temporal e espacialmente, promovendo alterações na dinâmica dos processos erosivos (WALLING, 1983). Assim, surge a necessidade de compreensão aprofundada das condições hidrogeomorfológicas que determinam a erosão de ravinas, principalmente devido à especificidade do conjunto de fatores de formação que cada feição erosiva apresenta, o qual determina a dinâmica exclusiva de cada ravina (VITTE; MELLO, 2007).

Estudos tem buscado avaliar as condições de formação e expansão de ravinas e voçorocas (VANWALLEGHEM *et al.*, 2005), principalmente dos fatores de controle desses fenômenos. Contudo, a interação entre a erosão da ravina e os processos hidrológicos atuantes precisa ser mais bem compreendida (POESEN, 2011). O monitoramento associado à modelagem pode auxiliar na compreensão das dinâmicas envolvidas, obtendo-se taxas de escoamento e erosão, além da sua espacialização (NICHOLS *et al.*, 2016).

Pesquisas na área da hidrogeomorfologia indicam tendência à modelagem dos sistemas ambientais visando a compreensão dos mecanismos erosivos e mudanças ambientais sobre a intensidade da erosão e previsão da dinâmica hidrossedimentológica das feições geomorfológicas (POESEN; VANDAELE; WESEMAEL, 1998; CHRISTOFOLETTI, 1999; SANTOS, 2009). Os primeiros modelos relacionados à geomorfologia foram desenvolvidos baseando-se nas teorias incorporadas da biologia, bioquímica e ecologia (LOTKA, 1925). Posteriormente, novos conhecimentos foram sendo agregados (TROFIMOV; MOSKOVKIN, 1984).

A previsão da dinâmica hidrogeomorfológica de ravinas e voçorocas foi inicialmente idealizada na forma de modelos computacionais por Favis-Mortlock (2000), com um modelo denominado RillGrow. O Favis-Mortlock considera no início do processo o desenvolvimento do escoamento em sulcos, tendo como perspectiva a conexão de diversas micro ravinas, gerando possíveis ravinas maiores. Contudo, sua metodologia não-distribuída dificulta a compreensão dos processos envolvidos na erosão avaliada, além de que o modelo não considera as propriedades físicas da bacia em seus processos (GUERRA, 1997).

Modelos empíricos de erosão de cabeceiras de feições erosivas lineares foram desenvolvidos empregando informações básicas como área de drenagem e atributos do solo, obtendo-se resultados médios satisfatórios de expansão ao longo do tempo (RENGERS; TUCKER, 2014; ALLEN *et al.*, 2018). A utilização de modelos mais simplificados é ampla por oferecer resultados semelhantes aos produzidos por modelos complexos, em que a grande quantidade de parâmetros de entrada também causa incertezas (ALLEN *et al.*, 2018).

Os modelos semi-empíricos podem ser utilizados para facilitar a previsão de respostas com simulações de erosão, mesclando bases físicas com parâmetros estocásticos (SOROOSHIAN, 1991; MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003, p.768; VIGIAK *et al.*, 2006). Os elementos estocásticos presentes em modelos aplicados em ravinas podem conter parâmetros de difícil dimensionamento, como irregularidades de erosão relacionada à infiltração (água subterrânea), desabamento de paredes, ação da biota, padrão de dissecação por escoamento linear, crescimento de vegetação, formas de intemperismo e formação de solo (SIDORCHUK, 2005).

Alguns modelos mais recentes foram concebidos abrangendo a formação evolutiva de sulcos e ravinas em encostas, proposta do modelo AnnAGNPS (BINGNER; THEURER, 2005; BINGNER *et al.*, 2018), o qual forneceu bases científicas para simulações diárias ou anuais de feições pequenas em áreas agrícolas. O modelo também avalia a erosão de ravinas, contudo necessita de melhor integração entre escoamento, solo e manejo do solo, além de considerar descarga com pico constante ao longo de todo o evento (BINGNER *et al.*, 2016).

Mesmo em modelos erosivos mais complexos, relações entre a erosão e condicionantes hidrogeomorfológicas ainda se mantém empíricas em muitos casos. Alguns exemplos de modelos de 2^a geração são GUEST, EUROSEM, KINEROS e WEPP. Estudos mais recentes indicam outros modelos conhecidos como de 3^a geração, que têm fortes relações com os métodos estocásticos, visando melhorias na modelagem da erosão do solo pelo escoamento e redução das incertezas inerentes às simulações, principalmente em eventos com taxas reduzidas de erosão (SIDORCHUK, 2005).

Os principais modelos aplicados na simulação de feições erosivas lineares capazes de prever taxas de erosão são o CREAMS, GLEAMS, EGEM e WEPP (POESEN, 2003). Esses modelos foram projetados para simulação de longos intervalos de tempo, utilizando dados diários de chuva acumulados ou mesmo eventos isolados com resolução mínima de 24 horas (FOSTER *et al.*, 1995, FLANAGAN; GILLEY; FRANTI, 2007; SCHULTZ, 2013; KNISEL, 1980; LEONARD; KINESEL; STILL, 1987; WOODWARD, 1999). No caso do modelo

CREAMS, é indicada a sua utilização em solos relativamente homogêneos (BINGNER *et al.*, 2016).

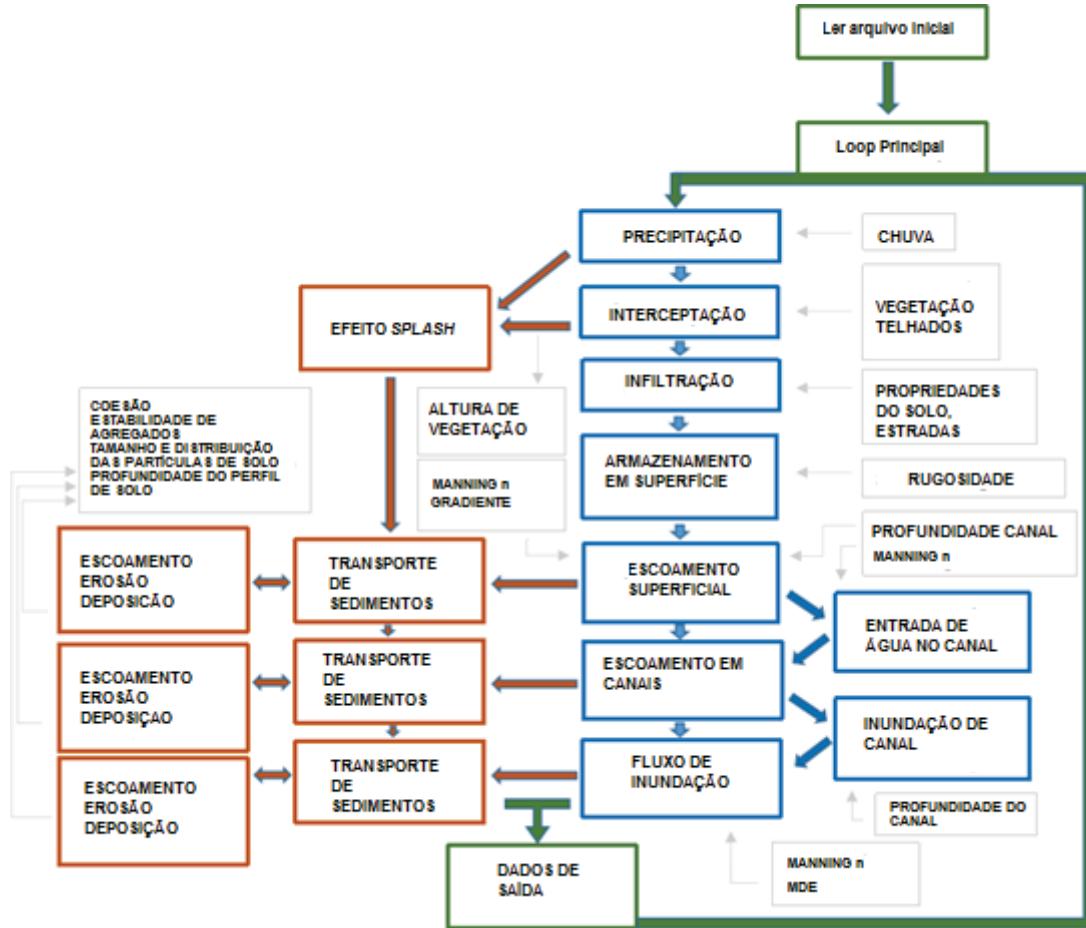
A existência de modelos de simulação de erosão e escoamento como os citados anteriormente possibilita a compreensão de diversos subprocessos inerentes ao fenômeno do ravinamento, contudo, muitos dos modelos citados não possuem validação necessária para a previsão dos impactos da erosão na produção de sedimentos, nos processos hidrológicos e na evolução de feições erosivas lineares (POESEN, 2011).

Um aspecto fundamental na modelagem é a escala temporal empregada na análise. As ravinas podem ser formadas ou expandidas com apenas alguns eventos de precipitação (NACHTERGAELE; POESEN, 2002), por isso surge a necessidade da aplicação da modelagem por eventos de precipitação na identificação dos processos atuantes. A modelagem para longos períodos, ao contrário, é mais geral e possibilita eliminar distorções de variações inerentes ao fenômeno erosivo sobre os resultados (OOSTWOUW WIJDENES; BRYAN, 2001).

A base científica para a elaboração de modelos de simulação de erosão baseados em eventos resume-se na tentativa de se avaliar a erosão exclusivamente provocada por eventos de precipitação (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996; TAKKEN *et al.*, 1999; BAARTMAN *et al.*, 2011; SCHULTZ, 2013). O modelo openLISEM, versão livre de *Limburg Soil Erosion Model*, é um modelo físico baseado em eventos que simula os mecanismos de geração de escoamento e produção de sedimentos em bacias hidrográficas, utilizando-se de vasto conjunto de dados de entrada e variações das condições de uso do solo em alta resolução, o que o distingue dos demais.

O modelo openLISEM tem como principais entradas a série de precipitação, o modelo digital do terreno e os atributos físicos do solo, vegetação e manejo do solo. Um esquema simplificado representando as principais entradas e saídas do modelo encontra-se apresentado na FIGURA 35.

FIGURA 35 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DO MODELO OPENLISEM, COM AS PRINCIPAIS ENTRADAS E SAÍDAS INDICADAS PELAS FLECHAS FINAS, ENQUANTO OS FLUXOS DE ENERGIA E CONEXÕES SÃO INDICADOS POR FLECHAS LARGAS



FONTE: OPENLISEM DOCUMENTATION & USER MANUAL (2018).

Diversos mecanismos podem ser simulados com o modelo openLISEM, como interceptação, infiltração, armazenamento em superfície, erosão por efeito *splash*, erosão pela tensão de cisalhamento do escoamento, transporte e deposição de partículas de solo. Suas principais saídas são as descargas líquida e de sedimentos (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996; STOLTE et al., 2003).

O aspecto mais relevante do openLISEM está na espacialidade que abrange seus parâmetros de entrada e resultados, possibilitando variar as diversas condições físicas da bacia em estudo (TAKKEN et al., 1999). Suas aplicações variam desde bacias hidrográficas (GOMES et al., 2008; MORO, 2011) até pequenos trechos de estradas não pavimentadas (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996; CHRISTOFOLLETTI, 1999; SCHULTZ, 2013), incluindo processos de erosão laminar e em sulcos (BAUMANN et al., 2019).

Nos últimos anos, com o aprimoramento do openLISEM e incorporação de novas funções, alguns trabalhos têm utilizado o modelo para estudar fluxos de detritos e

suscetibilidade à erosão por deslizamentos de terra (MA, 2018; VUGT, 2018). O modelo também já foi aplicado para o estudo de voçorocas, oferecendo resultados satisfatórios de escoamento e produção de sedimentos (STOLTE *et al.*, 2003). Estudos com o modelo openLISEM obtiveram bons resultados para bacias hidrográficas (MAGANO *et al.*, 2016) e trechos de estradas não pavimentadas (SCHULTZ, 2013), confirmando a aplicabilidade do modelo nas condições ambientais brasileiras.

O openLISEM tem as seguintes limitações principais na modelagem de ravinas: *i*) incapacidade de alteração do relevo, negligenciando a expansão das feições, o que pode ser minimizado em ravinas com expansibilidade reduzida; e, *ii*) a ausência de metodologias de cálculo do material erodido entre os eventos de precipitação pela ação do intemperismo, desconsiderando a geração de partículas que podem contribuir significativamente para a produção de sedimentos (HESSEL; ASCH, 2003; GUO *et al.*, 2019). Contudo, mesmo com essas limitações, o modelo permite compreender uma parte importante dos processos de erosão em ravinas (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996).

A literatura ressalta que é importante o estudo da erosão de ravinas em estradas não pavimentadas em zonas de povoamento de *Pinus taeda* (GARCIA, 2003; ZOCCAL, 2007). A identificação das áreas internas de erosão e deposição, bem como a quantificação de mecanismos complexos como erosão por efeito *splash* e por escoamento, são fundamentais para a compreensão da dinâmica hidrogeomorfológica das ravinas. As partículas de solo erodidas e transportadas podem representar alterações hidrogeomorfológicas importantes (MEGAHAN; KIDD, 1972).

A bacia hidrográfica experimental do Rio Saci, localizada em Rio Negrinho/SC, é composta de povoamento de *Pinus* onde se destacam estradas não pavimentadas utilizadas na extração dos troncos. Essas estradas permanecem abandonadas e sem manutenção por vários anos nos períodos de crescimento das árvores, intensificando os processos erosivos que culminam na formação de ravinas. A modelagem dessas feições erosivas lineares possibilita a avaliação da dimensão do problema, permitindo a determinação da dinâmica hidrogeomorfológica das ravinas nesses ambientes.

Considerando os aspectos apresentados anteriormente, teve-se como objetivo no presente trabalho determinar os mecanismos específicos atuantes na dinâmica hidrogeomorfológica das ravinas com o modelo openLISEM 6.41, simulando eventos de precipitação monitorados em duas ravinas localizadas em estradas não pavimentadas na bacia

hidrográfica experimental do Rio Saci, no município de Rio Negrinho/SC, comparando-se os resultados simulados com o monitoramento empreendido na área.

6.2. MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem hidrossedimentológica foi realizada por eventos de precipitação selecionados, monitorados na bacia hidrográfica experimental do Rio Saci, no município de Rio Negrinho/SC, utilizando-se o modelo openLISEM v.6.41. Os eventos utilizados para simulação das ravinas foram monitorados pelo LHG e dados foram coletados entre 2017 e 2019.

Foram selecionados oito eventos dentre os vinte eventos monitorados (citados no capítulo 2), levando em conta diferentes condições de precipitação, escoamento e produção de sedimentos (Tabela 4). O Evento 5 foi selecionado por ser um evento de pequeno porte, interessante para ser testado no openLISEM. Os Eventos 17 e 19 forneceram produção de sedimentos apenas para a Ravina com *Pinus*, enquanto os Eventos 10 e 16 apresentam dados apenas para a Ravina Lindeira.

TABELA 4 – PRECIPITAÇÃO (mm), DATA, INTENSIDADES I₁₀ E I₃₀ (mm h⁻¹), ESCOAMENTO (mm), PICO DE ESCOAMENTO (L s⁻¹), PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (kg) E PICO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (g s⁻¹) DOS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO SELECIONADOS PARA AS SIMULAÇÕES NO OPENLISEM DAS RAVINAS COM *PINUS* (RP) E LINDEIRA (RL)

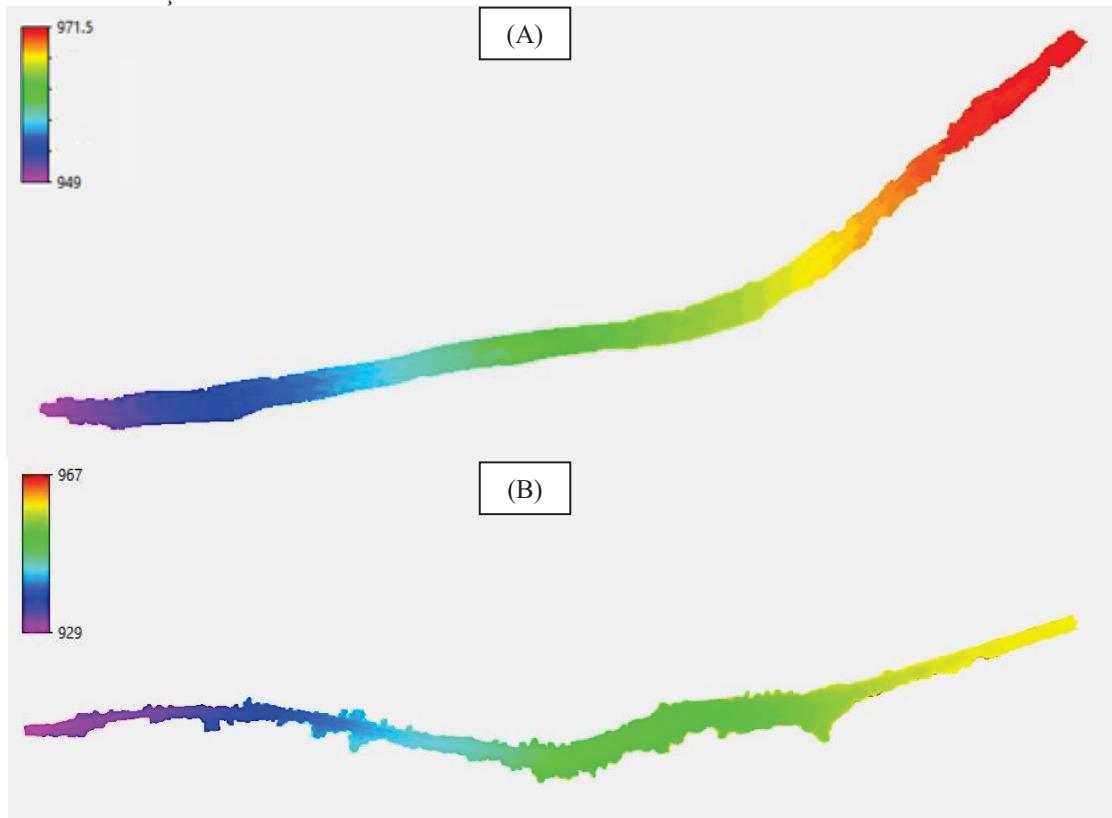
EVENTO	P (mm)	DATA	I ₁₀	I ₃₀	E (mm)		Q _p (L s ⁻¹)		Q _{st} (kg)		Q _{sp} (g s ⁻¹)	
			(mm h ⁻¹)	(mm h ⁻¹)	RP	RL	RP	RL	RP	RL	RP	RL
5	3,30	02/08/2019	6,1	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
6	3,81	09/10/2017	4,6	3,6	1,2	2,5	0,5	2,2	1,8	20,0	1,4	8,3
9	11,2	15/05/2018	24,4	14,3	0,5	1,5	0,5	4,4	—	—	—	—
10	22,1	10/10/2017	15,2	13,2	—	3,7	—	3,3	—	38,5	—	14,9
16	58,9	06/10/2017	18,3	15,2	—	7,9	—	3,9	—	47,2	—	20,0
17	86,3	10/01/2018	131,9	48,7	19,6	—	17,4	—	230,8	—	107,7	—
19	106,7	22/12/2018	59,5	40,7	9,2	48,0	5,9	12,4	8,8	—	8,1	—
20	113,28	29/09/2017	30,5	21,3	27,3	18,8	4,8	9,3	36,4	180,6	27,2	54,1

O modelo digital do terreno foi obtido com um levantamento topográfico feito pelo LHG, com o uso de RPA na área de estudo (FIGURA 36). Uma reamostragem de *pixels* para a redução do tamanho do arquivo no QGIS foi necessária, para possibilitar a realização das simulações. O modelo reamostrado apresentou resolução de 0,25 m para a Ravina com *Pinus* e 0,30 m para Ravina Lindeira. A escolha dos tamanhos de *pixels* levou em consideração os menores valores possíveis que permitiam a realização das simulações no modelo openLISEM.

A redução na resolução foi necessária devido ao grande uso de processamento pelo modelo openLISEM com os MDTs originais, o que impedia o prosseguimento das operações.

Foram inseridas imagens com a distribuição dos parâmetros de entrada produzidas no PCRaster considerando a área de drenagem das Ravinas com *Pinus* (FIGURA 36a) e Lindeira (FIGURA 36b).

FIGURA 36 - MODELOS DIGITAIS DO TERRENO REPRESENTADOS NO PCRASTER PARA A ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO (A) DA RAVINA COM *PINUS* E (B) RAVINA LINDEIRA, COM AS PORÇÕES MAIS ALTAS DO TERRENO NO LADO DIREITO DE CADA IMAGEM



Os parâmetros básicos de entrada no modelo openLISEM, obtidos como resultado da calibração encontram-se apresentados na Tabela 5. Os parâmetros estão especificados por evento, pois foi necessária calibração individual mediante a dificuldade do modelo openLISEM de reproduzir todos os eventos com a mesma calibração. A variação de alguns parâmetros entre o leito da ravina e a superfície da estrada ou barrancos foi adotada: *coh* foi maior no interior das ravinas, e *ksat* e *d50* apresentam valores maiores na superfície das estradas. A vegetação foi considerada na modelagem a partir do Índice de Área Foliar (IAF) calibrado para a Ravina com *Pinus*.

TABELA 5 - PARÂMETROS DE ENTRADA DEFINIDOS PARA O MODELO OPENLISEM APLICADO NAS RAVINAS COM *PINUS* E LINDEIRA. OBSERVA-SE QUE OS VALORES FORAM DIFERENTES ENTRE OS

EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO, DEVIDO À AUSÊNCIA DE CALIBRAÇÃO QUE CONTEMPLASSE
TODOS OS RESULTADOS MONITORADOS

Parâmetro*	Eventos de precipitação											
	5 RP e RL	6	9	10	16	17	19	20	RP	RL	RP	RL
n	0,1	0,2	0,2	0,6	0,5	0,6	1	1	2	1,5	2	1,5
rr (cm)	0,02	0,02	0,25	0,02	0,3	0,3	0,3	0,02	0,02	0,3	0,02	0,3
ksat (mm h⁻¹)	0,2	0,65	0,06 – 0,4	12	1 - 6	0,85 – 5,15	0,5 - 3	12	16	0,8 - 5	16	1 - 6
psi (cm)	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
Aggrstab	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
coh (KPa)	75- 100	100- 135	160- 225	75- 100	100- 150	100- 150	100- 135	100- 135	100- 150	100-- 135	100- 150	100- 150
d50 (μm)	30- 200	30- 200	15-50	30- 200	15-50	15-50	15-50	200	200	15-50	30- 200	15-50
thetai (%)	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
thetas (%/100)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Profundidade do Solo (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
IAF	0	4	0	4	0	0	0	4	4	0	4	0
Equação coeficiente destacamento do solo	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF

Sendo: * *n* – coeficiente de Manning; *rr* – rugosidade randômica; *ksat* –condutividade hidráulica saturada; *psi* – potencial matricial na frente de molhamento; *aggrstab* – estabilidade de agregados; *coh* – coesão do solo; *d50* – diâmetro dos sedimentos; *d90* – diâmetro médio de 90% dos sedimentos; *thetai* – umidade inicial do solo; *thetas* – porosidade; prof. do solo – espessura total de solo estimada para a área de estudo; IAF – Índice de Área Foliar; RP – Ravina com *Pinus*; RL – Ravina Lindeira; MMF – modelo de infiltração Morgan-Morgan-Finey.

FONTE: SCHULTZ (2013); TAKKEN *et al.* (1999); O AUTOR (2020).

Os parâmetros *n*, *aggrstab*, *thetas* e profundidade do solo foram obtidos de Schultz (2013), que aplicou o modelo LISEM na mesma área de estudo do presente trabalho, enquanto *rr* foi obtida de Takken *et al.* (1999), que levantaram valores para cada parâmetro de entrada conforme as características de áreas de estudo genéricas. *Coh*, *d50* e *ksat* foram obtidos de medições em campo e posteriormente calibrados conforme as métricas de aderência da série simulada com a série monitorada, enquanto *thetai* foi determinada unicamente no processo de calibração.

A equação do coeficiente de eficiência de desagregação do solo pelo escoamento utilizada foi a mesma empregada no modelo Morgan-Morgan-Finey (MMF), descrita por Morgan (2001), disponível na interface do modelo openLISEM, a qual forneceu resultados mais aproximados de produção de sedimentos para as ravinas analisadas.

A utilização de parâmetros específicos para cada evento simulado não seria aceitável em aplicações em que as simulações seriam utilizadas para fazer previsões em tempo real.

Quando a modelagem é utilizada como ferramenta de investigação, como no presente estudo, a variação dos parâmetros não compromete os resultados e eventualmente pode até auxiliar no entendimento da complexidade dos processos naturais envolvidos.

A análise estatística dos resultados da modelagem foi realizada comparando os respectivos valores simulados e monitorados das séries de vazão ($L\ s^{-1}$) e produção de sedimentos ($g\ s^{-1}$), utilizando o coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970) (Equação 2).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum (E_{sim} - E_{obs})^2}{\sum (E_{obs} - \bar{E}_{obs})^2} \right] \quad (2)$$

Em que: E_{sim} é o valor simulado (unidade da variável); E_{obs} é o valor observado (unidade da variável); \bar{E}_{obs} a média da série de valores observados (unidade da variável).

Foram utilizados conjuntos de imagens produzidos pelo modelo ao longo da simulação dos eventos para avaliar os processos erosivos atuantes sobre a dinâmica hidrogeomorfológica nas diferentes porções das ravinas. Para caracterização dos fenômenos observados, também foram utilizadas saídas calculadas no modelo, como: infiltração (mm); escoamento total (mm); erosão por efeito *splash* (toneladas); erosão por escoamento (toneladas); descarga de pico ($L\ s^{-1}$); e pico de produção de sedimentos ($g\ s^{-1}$).

6.3. RESULTADOS

Os resultados de escoamento total e de pico de descarga foram próximos entre os totais monitorados e simulados (Tabela 6), o que corrobora a aproximação das séries de escoamento e produção de sedimentos simuladas com as monitoradas. Os eventos analisados produziram sedimentos com totais superestimando os valores reais monitorados, mesmo com calibrações específicas para cada evento de precipitação selecionado. Os resultados indicam que pequenas modificações na dinâmica das séries de produção de sedimentos podem estar relacionadas a grandes alterações nos resultados acumulados. Os picos de produção de sedimentos simulada variaram bastante, com alguns semelhantes aos monitorados, como no caso do Evento 16 para a Ravina Lindeira.

TABELA 6 - RESULTADOS MONITORADOS (M) E SIMULADOS (S) DE ESCOAMENTO TOTAL (E_t), VAZÃO MÁXIMA (Q_p), PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (Q_{st}), PICO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (Q_{sp}), EROSÃO POR *SPLASH* (Q_{splash}) E EROSÃO POR ESCOAMENTO ($Q_{escoamento}$) PARA CADA EVENTO DE PRECIPITAÇÃO

EVENTO	P (mm)	Et (mm) *		Qp ($L s^{-1}$) *		Qst (kg) *		Qsp ($g s^{-1}$) *		Qsplash (kg) *		Qescoamento (kg) *	
		RP	RL	RP	RL	RP	RL	RP	RL	RP	RL	RP	RL
M*	5	3,30	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	—	—	—	—
S*	5	3,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0
M*	6	3,81	1,20	2,61	0,50	2,18	1,81	20,03	1,40	8,31	—	—	—
S*	6	3,81	0,68	1,48	0,44	1,78	22,23	75,18	16,85	27,19	5,14	8,51	8,82 376,02
M*	9	11,17	3,94	1,62	0,95	4,41	—	—	—	—	—	—	—
S*	9	11,17	1,06	3,86	0,59	3,79	22,22	66,56	13,10	113,60	29,93	35,58	120,62 248,49
M*	10	22,1	—	2,58	—	3,31	—	40,02	—	14,80	—	—	—
S*	10	22,1	—	2,12	—	2,07	—	55,49	—	17,66	—	13,68	— 180,01
M*	16	58,9	—	5,52	—	3,88	—	47,28	—	19,96	—	—	—
S*	16	58,9	—	5,69	—	3,54	—	76,01	—	19,47	—	113,79	— 391,80
M*	17	86,3	81,98	—	18,68	—	230,82	—	—	—	—	—	—
S*	17	86,3	18,15	—	7,32	—	399,79	—	183,45	—	27,64	—	814,67 —
M*	19	106,7	29,31	33,61	5,85	12,35	8,78	—	8,05	—	—	—	—
S*	19	106,7	24,71	64,69	4,42	26,92	179,34	448,85	51,62	42,35	37,96	100,71	756,36 1053,16
M*	20	113,28	27,29	19,89	4,81	9,31	36,42	180,56	27,22	54,13	—	—	—
S*	20	113,28	43,88	13,35	4,01	8,15	390,32	201,31	74,28	40,79	113,45	203,91	2361,08 751,87

* Monitorados (M) e simulados (S) de escoamento (E_t), vazão máxima (Q_p), produção de sedimentos acumulada (Q_{st}), produção de sedimentos máxima (Q_{sp}), erosão por efeito splash (Q_{splash}) e erosão por escoamento ($Q_{escoamento}$) para cada evento na Ravina com *Pinus* (RP) e na Ravina Lindeira (RL).

De modo geral, a simulação das ravinas produziu séries de vazão e produção de sedimentos consistentes com os dados monitorados, reproduzindo alguns dos mecanismos atuantes sobre a dinâmica hidrogeomorfológica verificada em campo, apesar das grandes variações nos totais acumulados de escoamento e erosão.

A modelagem apresentou valores próximos do monitoramento de escoamento total e pico de vazão para os eventos 6, 9, 10, 16 e 19, e destoou nos eventos 17 e 20. Para a produção de sedimentos total e pico de produção de sedimentos, os valores simulados e monitorados foram próximos apenas no evento 10 e para a Ravina Lindeira no evento 20.

Os valores de erosão por escoamento foram maiores do que os valores de erosão por efeito *splash* em todos os eventos simulados (chegando a 47 vezes maior para o Evento 6 na Ravina Lindeira). Entre as ravinas, os valores foram quase todos maiores para a Ravina Lindeira (chegando a 42 vezes maior para a erosão por escoamento no Evento 6), com exceção apenas da erosão por escoamento da Ravina com *Pinus* no evento 20, que foi mais de três vezes superior ao da Ravina Lindeira.

Os coeficientes de Nash e Sutcliffe (1970) (Tabela 7) foram próximos de 1 para as séries de vazão da Ravina com *Pinus*. Contudo, apenas o Evento 17 apresentou NSE positivo próximo de 1 para a produção de sedimentos da Ravina com *Pinus*, enquanto para a Ravina Lindeira, os Eventos 10 e 20 forneceram coeficientes NSE próximos de 1. Os eventos que não apresentaram dados nas séries monitoradas ou simuladas não forneceram coeficientes. A estimativa de aproximação entre as séries simulada e monitorada indicou uma boa simulação do escoamento, mas resultados ruins para a erosão.

TABELA 7 – COEFICIENTES NSE OBTIDOS ENTRE AS SÉRIES MONITORADAS E SIMULADAS DE VAZÃO E DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PARA CADA EVENTO DE PRECIPITAÇÃO NAS RAVINAS COM *PINUS* E LINDEIRA

	Ravina com <i>Pinus</i>		Ravina Lindeira	
	Vazão	Prod. de Sedimentos	Vazão	Prod. de Sedimentos
Evento 5	—	—	—	—
Evento 6	0,75	-258,57	0,80	-8,82
Evento 9	-1,98	—	0,56	—
Evento 10	—	—	0,64	0,29
Evento 16	—	—	0,45	-0,98
Evento 17	0,57	0,23	—	—
Evento 19	0,75	-210,65	-0,54	—
Evento 20	0,21	-14,56	0,48	0,31

O modelo openLISEM superestimou a vazão do Evento 9 para a Ravina com *Pinus* e do Evento 19 para a Ravina Lindeira, produzindo coeficientes NSE negativos. Essa subestimação ocorreu devido às alterações de cobertura de vegetação e mudanças morfológicas das ravinas surgidas com a evolução do relevo interno, o que dificultou a calibração nesses casos, já que os Eventos 9 e 19 (maio e dezembro de 2018) são os mais recentes antes do Evento 5 (agosto de 2019).

Comparando-se as calibrações do Evento 6 das ravinas (Tabela 5) verifica-se que a modelagem da Ravina com *Pinus* exigiu coeficientes de Manning semelhantes (0,2), mas a condutividade hidráulica saturada ($0,65 \text{ mm h}^{-1}$) foi maior do que na Ravina Lindeira (0,06 a $0,4 \text{ mm h}^{-1}$) para a aproximação com os dados de vazão monitorados. Assim, a condutividade hidráulica pode ter sido afetada pela vegetação de *Pinus*, alterando a quantidade de água disponível na superfície do solo.

Comparado à calibração do Evento 6 (condutividade hidráulica saturada $0,65 \text{ mm h}^{-1}$ e coeficiente de Manning 0,2), a calibração do Evento 9 apresentou parâmetros com magnitudes diferentes, chegando à condutividade hidráulica de 12 mm h^{-1} e coeficiente de Manning de 0,6 na Ravina com *Pinus*.

Comparando-se os valores calibrados dos parâmetros de entrada para as ravinas no Evento 20, observou-se que o coeficiente de Manning foi maior na Ravina com *Pinus* (2 frente a 1,5 na Ravina Lindeira), e a condutividade hidráulica saturada variou entre 1 e 6 mm h⁻¹ para a Ravina Lindeira e chegou a 16 mm h⁻¹ na Ravina com *Pinus*.

A calibração do Evento 19 apresentou semelhanças com a calibração do Evento 20, apenas com condutividade hidráulica saturada menor para a Ravina Lindeira (0,8 a 5 mm h⁻¹), devido ao intervalo de mais de um ano entre os eventos, com o Evento 20 ocorrendo em 2017 e o Evento 19 em 2018. Nesse período, ocorreu crescimento da vegetação, o que alterou a resposta hidrossedimentológica da ravina.

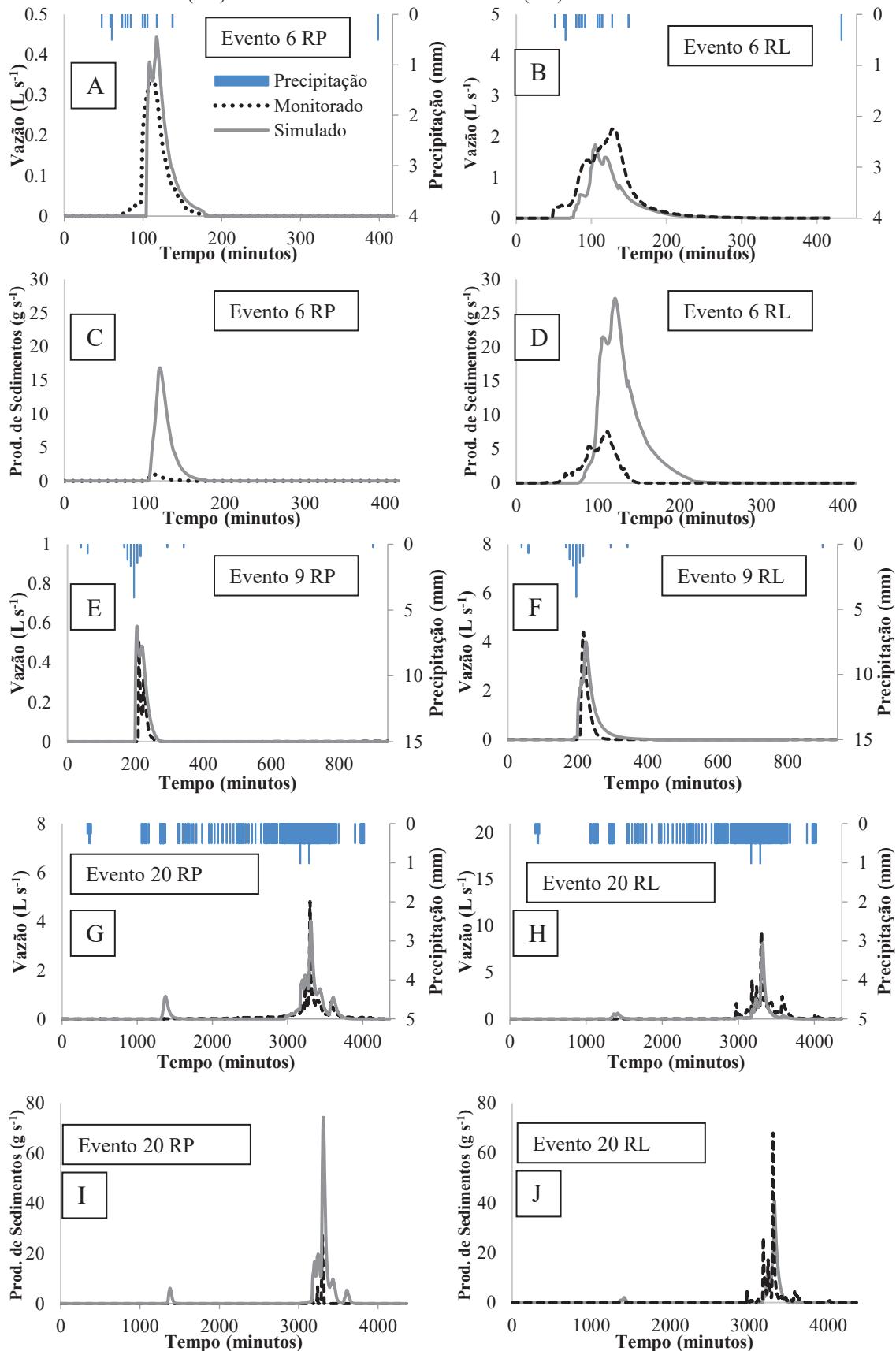
A calibração dos Eventos 10, 16 e 20 para a Ravina Lindeira foi diferente, apesar da proximidade temporal dos eventos, todos ocorridos no final de 2017. Nesse período, a vegetação não se alterou de modo expressivo, mas os valores do coeficiente de Manning (variando entre 0,6, 1 e 1,5 para os eventos 10, 16 e 20, respectivamente) e de condutividade hidráulica saturada (0,85 a 5,15, 0,5 a 3, 1 a 6 para os eventos 10, 16 e 20, respectivamente) se alteraram.

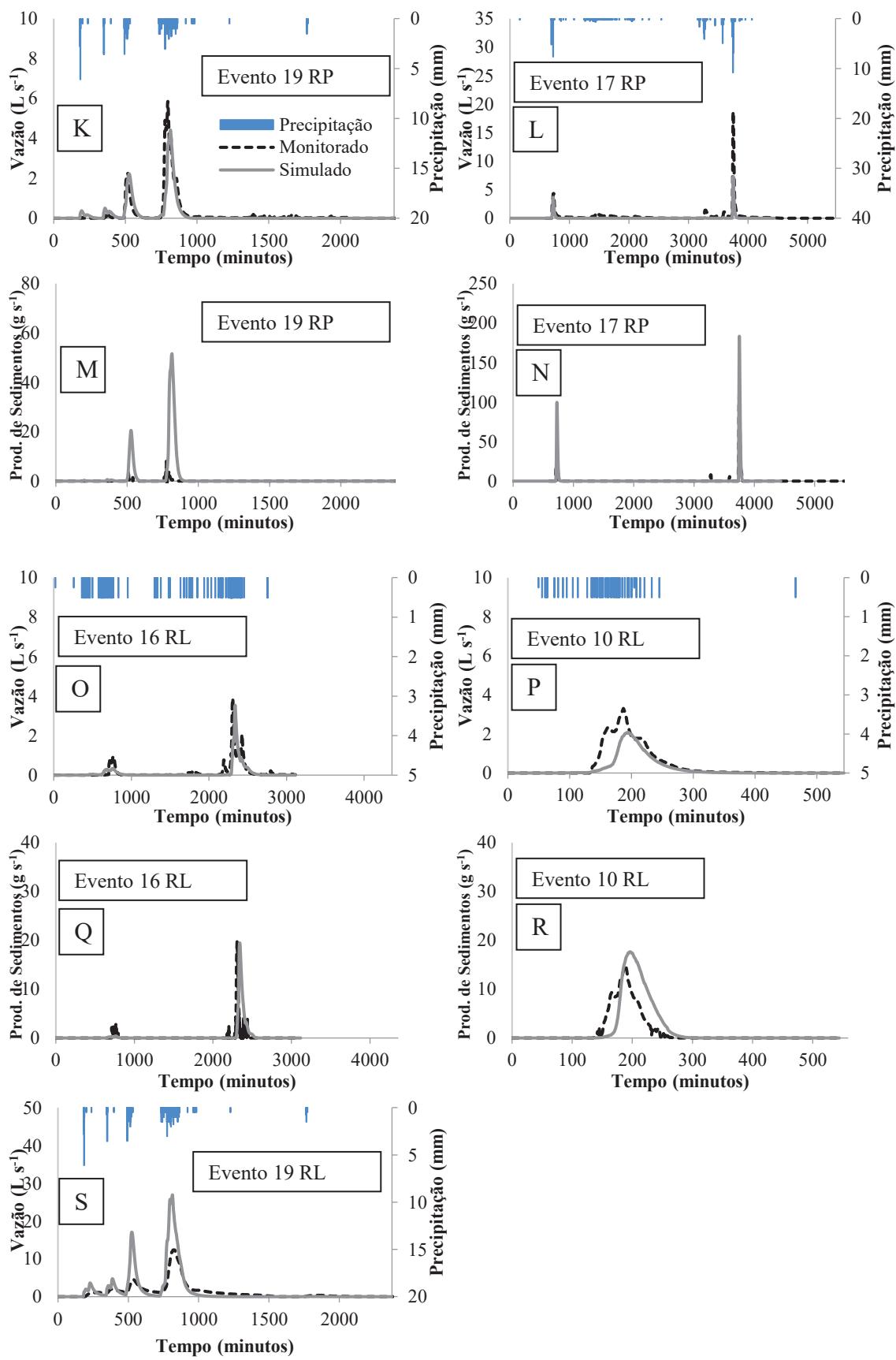
As simulações produziram hidrogramas e sedimentogramas a partir das séries de dados de vazão e produção de sedimentos das ravinas. Para a análise do comportamento hidrossedimentológico, optou-se por apresentar os resultados semelhantes em conjunto para facilitar as comparações. Assim, foram inicialmente inseridos os resultados dos eventos 6, 9 e 20 (FIGURA 37a à 37j), que apresentam dados para ambas as ravinas, seguido dos eventos 19 e 17 (FIGURA 37k à 37n, e 37s), que possuem séries de produção de sedimentos apenas para a ravina com *Pinus*, e por fim os eventos 10 e 16 (FIGURA 37o à 37r), simulados apenas para a ravina Lindeira.

Para o evento 5, com ausência de escoamento observado, também não foi obtido escoamento nas simulações das ravinas, indicando que para a calibração adotada, apesar de não validada, o modelo openLISEM se mostrou promissor na reproduzibilidade dos dados observados em campo. Nesse sentido, não foram inseridos os hidrogramas ou sedimentogramas do evento 5 nos resultados.

No caso do evento 6, foi possível obter resultados com as simulações bastante próximos das séries de dados monitoradas. Para a ravina com *Pinus* no evento 6, o modelo produziu um pico de vazão de 0,45 L s⁻¹, diferentemente da série monitorada, onde a vazão cresce lentamente para um pico menor, de 0,35 L s⁻¹.

FIGURA 37 – HIDROGRAMAS E SEDIMENTOGRAMAS DOS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO (A, B, C, D) 6, (E, F) 9, (G,H,I,J) 20, (K,M,S) 19, (L,N) 17, (O,Q) 16 E (P,R) 10, PARA A RAVINA COM PINUS (RP) E PARA A RAVINA LINDEIRA (RL)





A produção de sedimentos simulada no Evento 6 para a Ravina com *Pinus* superestimou os valores mensurados, gerando pico aproximado de 18 g s^{-1} , quando o monitoramento indicou pico máximo de 2 g s^{-1} . A dificuldade de calibração do openLISEM para aproximar os resultados de vazão prejudicou a produção de sedimentos.

Ao contrário do que ocorreu na Ravina com *Pinus*, a vazão simulada com o Evento 6 para Ravina Lindeira atrasou em relação aos dados monitorados, e o pico simulado ocorreu antes do monitorado, com valores inferiores. O declínio da curva de vazão simulada apresentou resultados semelhantes aos obtidos com o monitoramento. A produção de sedimentos do Evento 6 na Ravina Lindeira também foi superestimada, com declínio posterior da curva em relação à série monitorada.

No Evento 9, a simulação da Ravina com *Pinus* forneceu resultados consistentes para a vazão, com picos monitorados ($0,6 \text{ L s}^{-1}$) e estimados ($0,5 \text{ L s}^{-1}$) bem próximos. A modelagem da produção de sedimentos não foi realizada devido aos problemas encontrados nas séries monitoradas de ambas as ravinas. Isso ocorreu devido a um erro de posicionamento dos turbidímetros que comprometeu a entrada de água no interior dos equipamentos, impedindo a mensuração da turbidez e, consequentemente, da produção de sedimentos.

A vazão simulada do Evento 9 para a Ravina com *Pinus* se iniciou ligeiramente antes que a vazão monitorada, juntamente com o pico de precipitação. O atraso da vazão observada pode ser devido às depressões erosivas subestimadas pelo modelo ou devido a capacidade de infiltração do solo. O adiantamento da vazão simulada pode estar relacionado à calibração da rugosidade randômica imposta ao modelo. Descarta-se a possibilidade de alteração nas condições da chuva, devido à proximidade entre os pontos de monitoramento de precipitação e vazão.

O Evento 9 da Ravina Lindeira produziu vazão bem próxima dos dados monitorados. Apenas a posição do pico ficou atrasada após pequeno declínio que não foi observado nos dados mensurados. Após o atraso do pico, a curva de vazão simulada decaiu posteriormente à curva de vazão observada. Os picos de vazão para ambas as séries simulada e monitorada ficaram muito próximos.

A simulação da vazão do Evento 20 na Ravina com *Pinus* produziu resultados bem próximos dos monitorados, exceto por um pequeno pico de vazão ocorrido no início da precipitação gerado na simulação e que não foi verificado no monitoramento. A vazão cresceu mais lentamente nos dados monitorados, enquanto na simulação ela apresentou picos sucessivos, decaendo mais lentamente no final. O pico de vazão foi maior nos dados

monitorados, mas a diferença foi pequena em relação à simulação ($4,81 \text{ L s}^{-1}$ monitorado frente a $4,01 \text{ L s}^{-1}$ simulado). A produção de sedimentos simulada para o Evento 20, na Ravina com *Pinus*, gerou valores extremamente elevados em relação aos dados monitorados, com pico máximo superior a 70 g s^{-1} , contra 25 g s^{-1} monitorado.

A simulação da vazão e produção de sedimentos do Evento 20 na Ravina Lindeira apresentou consistência em relação aos valores monitorados em campo. A exceção foi para o pico mais elevado ($9,31 \text{ L s}^{-1}$ em relação a $8,15 \text{ L s}^{-1}$) para vazão e menor (60 g s^{-1}) para a produção de sedimentos.

A simulação do Evento 19 resultou em um pequeno pico de vazão, subestimando o escoamento monitorado na Ravina com *Pinus*. A produção de sedimentos foi superestimada, de modo semelhante aos outros eventos.

A série de produção de sedimentos da Ravina Lindeira para o Evento 19 não foi consistente, e por isso não foi simulada. A série de escoamento foi superestimada nos picos de vazão. Nos valores abaixo de 5 L s^{-1} da série, o modelo conseguiu reproduzir a série monitorada.

O Evento 17 gerou resultados monitorados consistentes apenas para a Ravina com *Pinus*, por isso, não foi simulado para a Ravina Lindeira. As séries simuladas manifestaram-se semelhantes às séries monitoradas, apesar da simulação subestimar o pico de vazão, enquanto a produção de sedimentos simulada foi novamente superestimada.

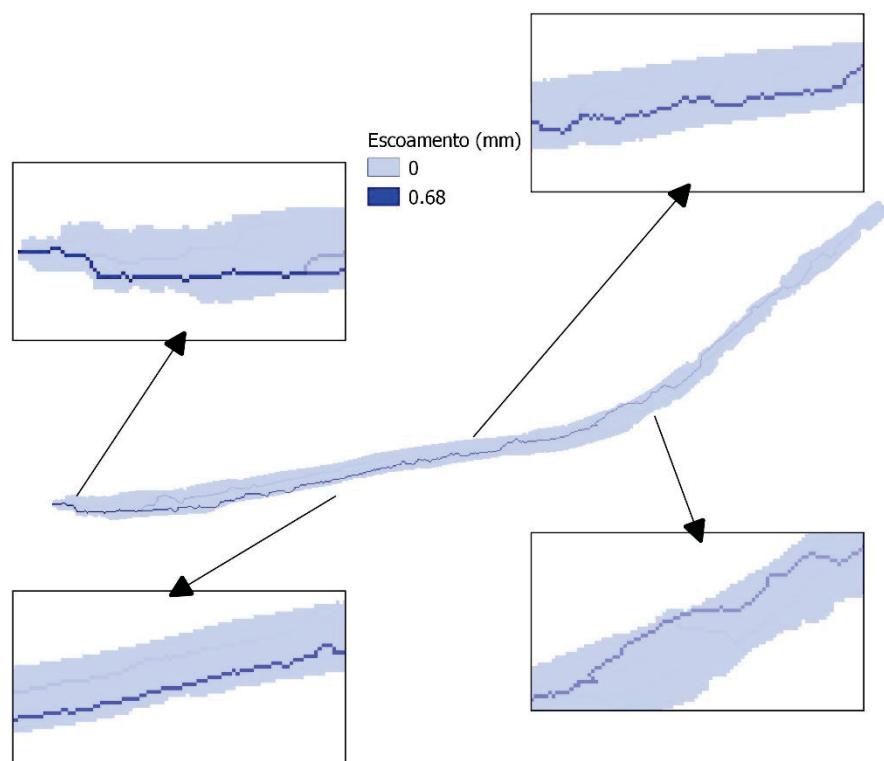
Não foi realizada a modelagem dos Eventos 10 e 16 para a Ravina com *Pinus* devido a problemas no monitoramento. Para a Ravina Lindeira, os resultados indicaram boa aproximação entre o monitoramento e a modelagem. Para o Evento 16, o pico de vazão simulado foi de cerca de $3,5 \text{ L s}^{-1}$, enquanto o monitorado situou-se em torno de 4 L s^{-1} . Também foi verificada uma boa aproximação da produção de sedimentos, com valores máximos de erosão em torno de 20 g s^{-1} .

No Evento 10, as séries simuladas de vazão e de produção de sedimentos foram semelhantes às séries monitoradas, com diferenças significativas apenas para o pico da curva de produção de sedimentos simulada (cerca de 3 g s^{-1} mais elevado do que o monitorado).

A concentração do escoamento no interior da ravina foi simulada coerentemente com o openLISEM nas ravinhas analisadas. No Evento 6 boa parte do escoamento é proveniente das porções mais altas em relação ao ponto de monitoramento, o que é visível pela concentração do escoamento no interior da ravina (FIGURA 38). O escoamento se iniciou na cabeceira, apesar de grande parte infiltrar nas porções intermediárias da ravina. Como grande parte da bacia se encontrava coberta com *Pinus*, a concentração do escoamento na estrada é a principal razão

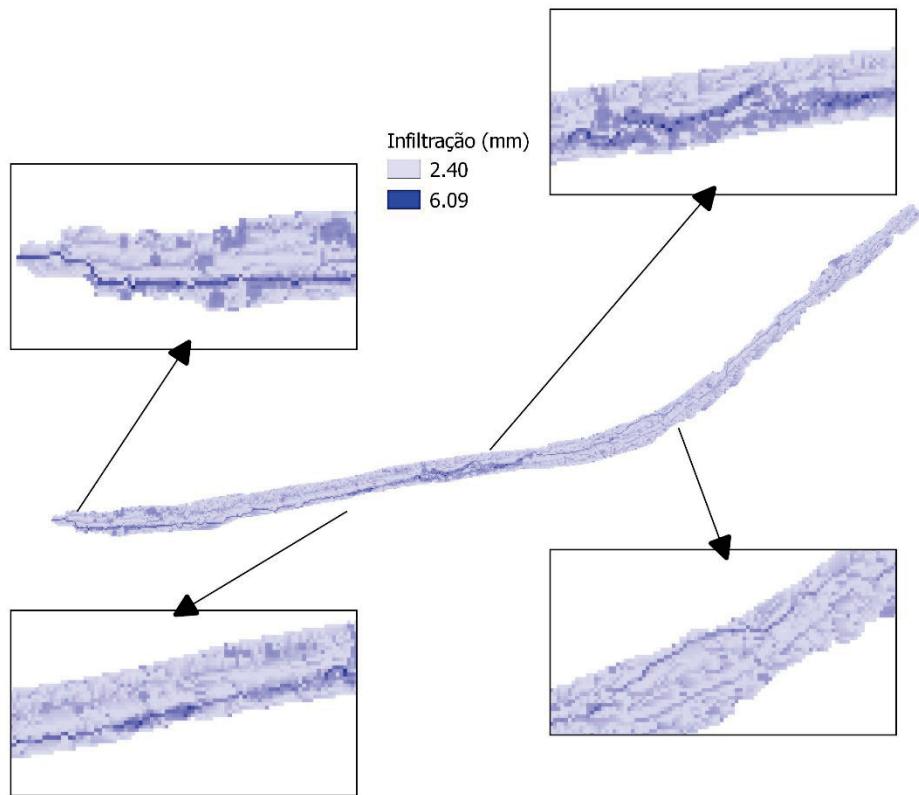
para a formação da ravina. Associados à concentração do escoamento, a declividade, a expressiva área de drenagem e o solo exposto também determinaram a formação das ravinas, conforme indica Patton e Schumm (1975) e King (1979), ainda que a Ravina com *Pinus* tenha recebido a vegetação com o plantio das árvores.

FIGURA 38 - ESCOAMENTO DISTRIBUÍDO PARA A RAVINA COM *PINUS* NO EVENTO 6. O ESCOAMENTO SIMULADO CONCENTROU-SE NO INTERIOR DA RAVINA (0,68 mm), CORROBORANDO OS RESULTADOS OBSERVADOS NO MONITORAMENTO



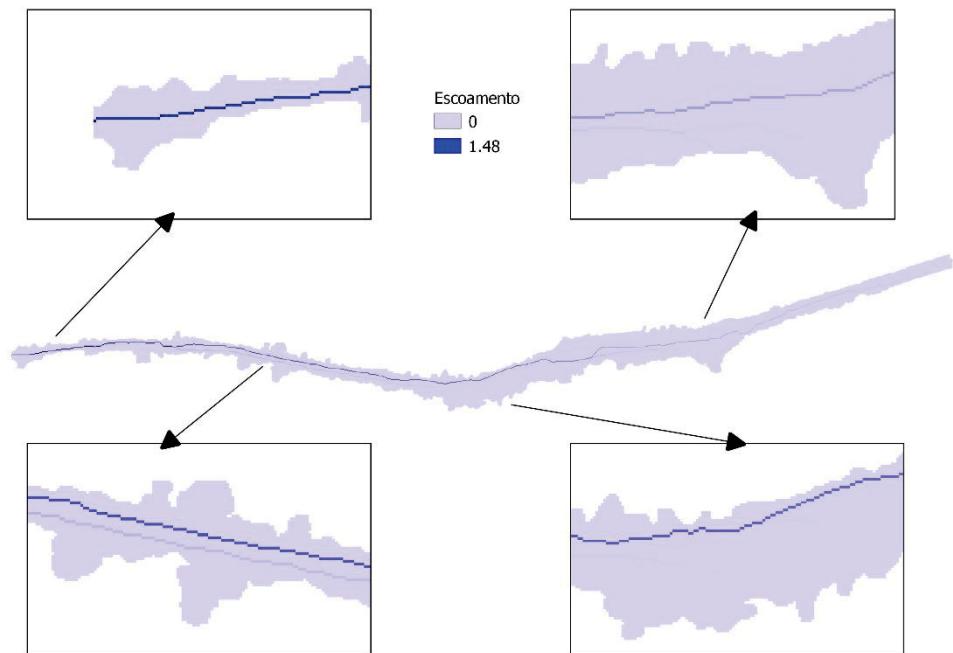
Boa parte da infiltração do Evento 6 também se concentrou no interior da Ravina com *Pinus* (FIGURA 39), principalmente nas porções de alargamento da feição erosiva nas depressões. Como a ravina tende a concentrar o escoamento, grande parte da água é direcionada às porções mais baixas, permanecendo estagnada mais facilmente do que no restante da encosta (VANWALLEGHEM *et al.*, 2005), onde predomina o escoamento laminar com menos energia e velocidade. Observou-se nas porções entressulcos da ravina menor infiltração.

FIGURA 39 - INFILTRAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA A RAVINA COM *PINUS* NO EVENTO 6. A INFILTRAÇÃO FOI MAIOR NO INTERIOR DA RAVINA (ATINGINDO 6,09 mm)



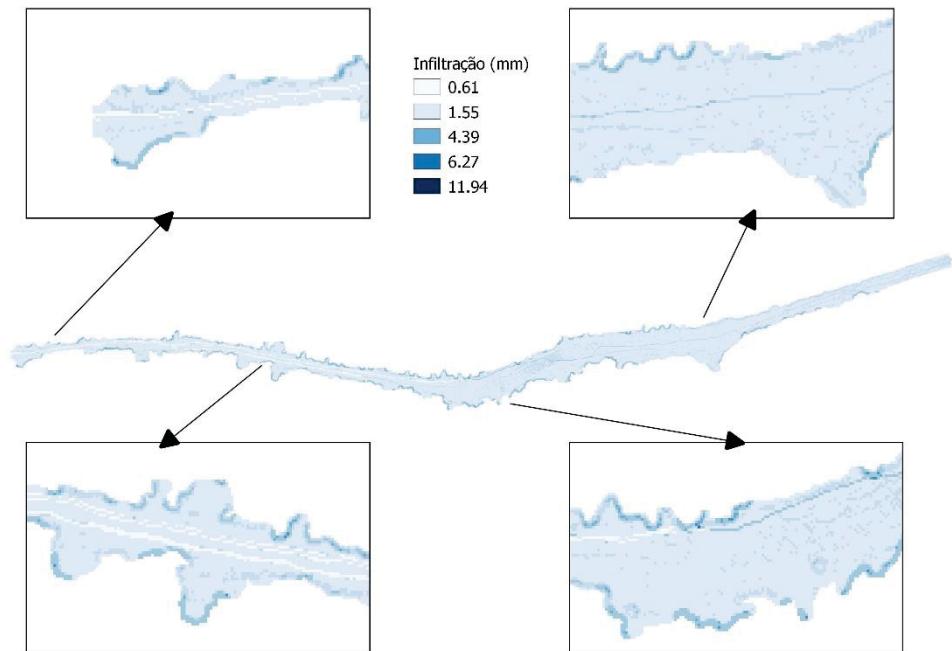
O escoamento distribuído para o Evento 6 indicou que a água da chuva se concentrou ao longo do interior da Ravina Lindeira (FIGURA 40), de modo semelhante ao que ocorreu na Ravina com *Pinus*. Contudo, a concentração foi mais alta (cerca de 6 mm) no ponto de monitoramento, indicando que a simulação conseguiu reproduzir variações na dinâmica hidrossedimentológica entre as ravinas.

FIGURA 40 – ESCOAMENTO DISTRIBUÍDO PARA A RAVINA LINDEIRA NO EVENTO 6. O ESCOAMENTO CONCENTROU-SE NO INTERIOR DA RAVINA, TANTO NO CANAL PRINCIPAL QUANTO NOS CANAIS LATERAIS



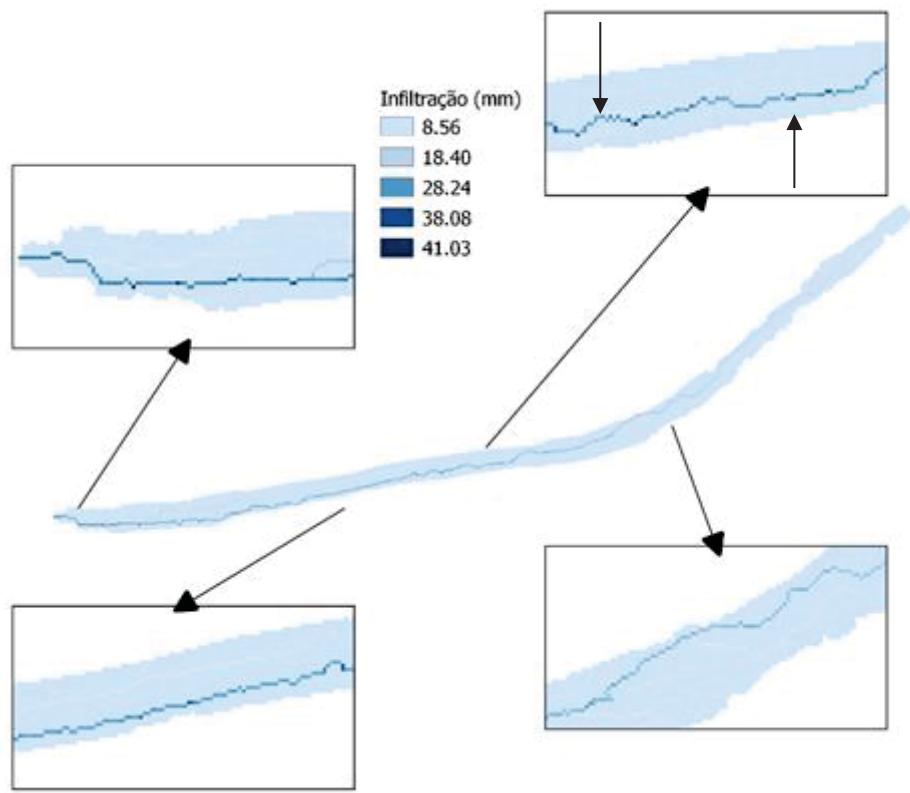
A infiltração da Ravina Lindeira para o Evento 6 se concentrou nas porções entressulcos e partes mais altas da área de contribuição da ravina (FIGURA 41). Logo, grande parte do escoamento infiltrou quando atingiu o solo, devido à reduzida magnitude do evento de precipitação. A Ravina Lindeira apresentou maior rugosidade interna com presença de depressões, que interferiram no processo de escoamento e infiltração.

FIGURA 41 - INFILTRAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA A RAVINA LINDEIRA NO EVENTO 6. A INFILTRAÇÃO CONCENTROU-SE NO INTERIOR DA RAVINA E NOS BARRANCOS LATERAIS. ALGUNS TRECHOS DA RAVINA APRESENTARAM INFILTRAÇÃO REDUZIDA, PRINCIPALMENTE NAS PORÇÕES SEM DEPRESSÕES.



Para o Evento 9, o escoamento também se concentrou no interior da ravina, mas com o valor máximo maior que o Evento 6. Apesar disso, o escoamento apresentou dinâmica muito semelhante à do Evento 6. O acúmulo de escoamento nas depressões podem ser a causa, conforme resultados distribuídos de infiltração (FIGURA 42). Nos Eventos 6 e 9, a infiltração foi mais relevante no interior da ravina do que no exterior. Contudo, como a quantidade de água disponível na superfície foi maior para o Evento 9, a influência das depressões foi maior, reduzindo a quantidade de escoamento à jusante.

FIGURA 42 - INFILTRAÇÃO DISTRIBUÍDA AO LONGO DA RAVINA COM *PINUS* PARA O EVENTO 9, COM DESTAQUE NA INFILTRAÇÃO DAS DEPRESSÕES (FLECHAS MENORES), O QUE NÃO FOI OBSERVADO NO ESCOAMENTO DO EVENTO 6



A maior infiltração no interior da ravina no Evento 9 indica a relevância das depressões. A infiltração acumulada também foi responsável pelos baixos valores acumulados de escoamento no ponto monitorado, havendo controle exercido pelas depressões. A influência das depressões fez com que um evento de magnitude superior apresentasse escoamento no ponto de monitoramento semelhante a outro evento quase três vezes menor.

Como o aspecto gráfico do escoamento e da infiltração distribuídos são semelhantes no restante dos eventos, optou-se por ocultá-los. Parte do escoamento gerado no Evento 9 na Ravina Lindeira foi proveniente das porções mais altas da bacia hidrográfica, compreendendo toda a ravina desde a cabeceira até o ponto de monitoramento, incluindo as porções mais altas da área de drenagem, atingindo um valor máximo de 2,76 mm.

A infiltração ocorrida na Ravina Lindeira para o Evento 9 (112,42 mm) concentrou-se no interior da ravina, e apresentou totais acumulados maiores que os verificados para o Evento 6. Grande parte da precipitação infiltrou no solo da bacia, e pequena porção produziu escoamento. Como ocorreu no interior da Ravina com *Pinus*, houve maiores infiltrações em

alguns pontos da Ravina Lindeira, onde os totais acumulados de infiltração atingiram valores bem mais altos do que o entorno (100 mm superior).

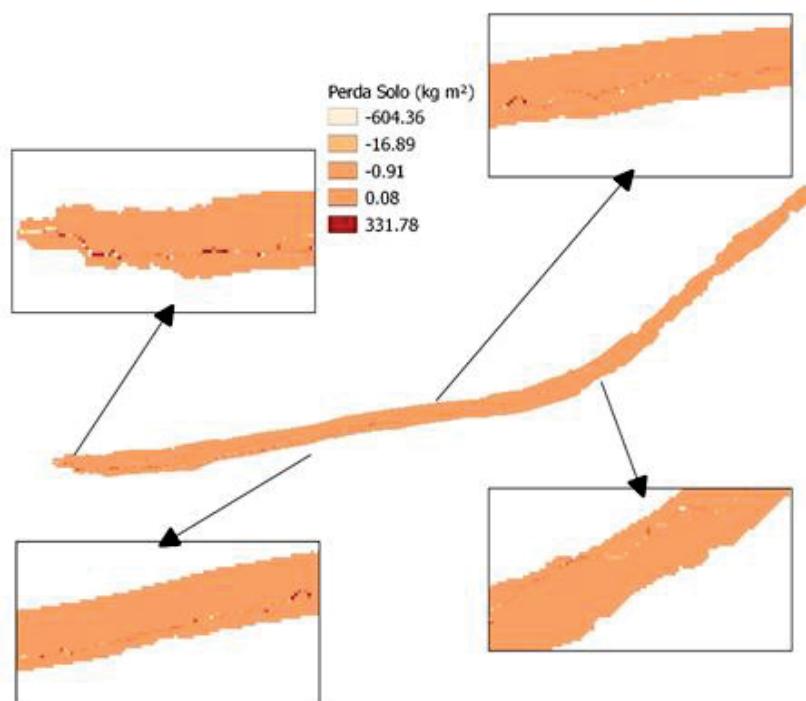
No evento 20, o escoamento concentrado simulado no interior da Ravina com *Pinus* correspondeu a 44 mm. A infiltração simulada, consequentemente, quando comparada com o restante dos eventos, apresentou valores expressivos (134,28 mm) principalmente nas porções onde estão presentes as depressões e próximo ao ponto de monitoramento. O comportamento da infiltração foi influenciado pelo consumo de energia nas quedas d'água constituídas nos desniveis, fazendo com que o escoamento tenha dificuldade para ultrapassar as depressões, atrasando o processo e armazenando água no seu interior. A infiltração de 134,28 mm na Ravina com *Pinus* foi maior do que a precipitação do Evento 20. As depressões concentram água proveniente de outras partes da área de drenagem, aumentando a altura de água infiltrada.

A Ravina Lindeira produziu na simulação do Evento 20 uma altura de escoamento concentrado de 13,35 mm. A infiltração atingiu mais de 309,49 mm de altura, mas apenas em alguns pontos específicos da ravina. Os valores mais comuns de infiltração simulada dentro da ravina variaram entre 40 e 250 mm, indicando que a infiltração foi mais alta que para a Ravina com *Pinus* (134,28 mm).

No restante dos eventos simulados, os valores de escoamento e infiltração máximos, respectivamente, foram de: 25 mm e 352,22 mm (Evento 19), 18,2 mm e 212,26 mm (Evento 17) para a Ravina com *Pinus*; 64,69 mm e 315,18 mm (Evento 19), 5,69 mm e 163,24 mm (Evento 16), 2,12 mm e 81,00 mm (Evento 10) para a Ravina Lindeira.

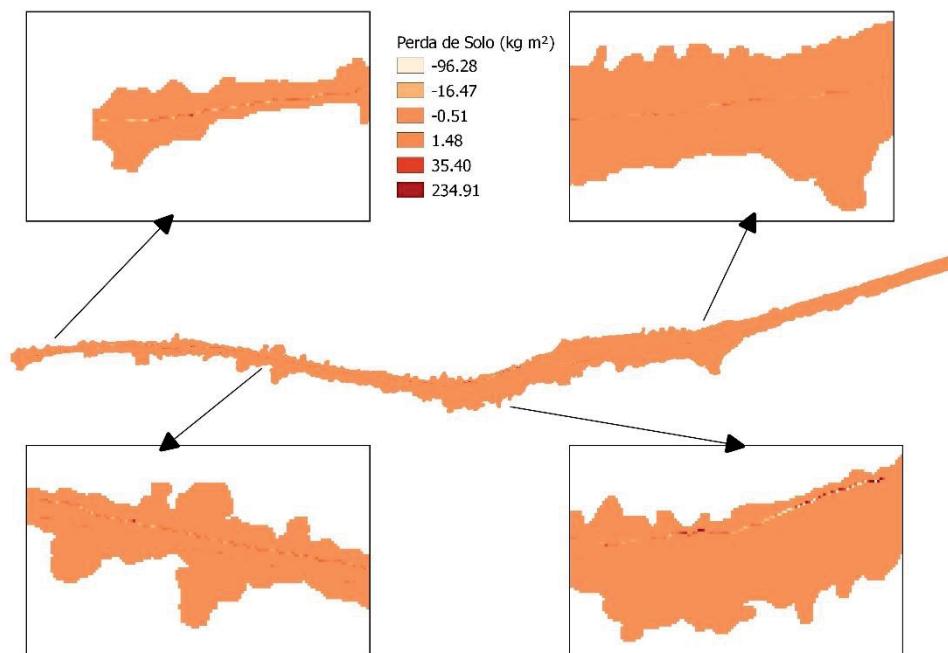
O balanço entre desagregação e deposição de partículas nos eventos de precipitação 6, 17 (FIGURA 43), 19 e 20 foram semelhantes, com destaque para a intensidade da erosão nas depressões das ravinas. A deposição é indicada com valores negativos, e a perda de solo é mensurada por valores positivos. Para o Evento 20, os valores de erosão e deposição atingiram os maiores patamares, com 973,74 kg m⁻² e -2025,07 kg m⁻², respectivamente, devido à magnitude de 113,28 mm do evento de precipitação.

FIGURA 43 - EROSÃO E DEPOSIÇÃO DISTRIBUÍDA AO LONGO DA RAVINA COM *PINUS* PARA O EVENTO 17. AS DEPRESSÕES IMPÔEM REGIME DE ALTERNÂNCIA ENTRE EROSÃO E DEPOSIÇÃO NO INTERIOR DA RAVINA



A dinâmica erosiva da Ravina Lindeira para os Eventos 6, 10, 16 e 20 (FIGURA 44) foi semelhante à observada na Ravina com *Pinus*. A erosão e a deposição foram maiores no interior dos sulcos para o Evento 20 (máximo de $234,91 \text{ kg m}^{-2}$ e $-96,28 \text{ kg m}^{-2}$, respectivamente), com intensidades dependentes da magnitude e intensidade da precipitação dos eventos.

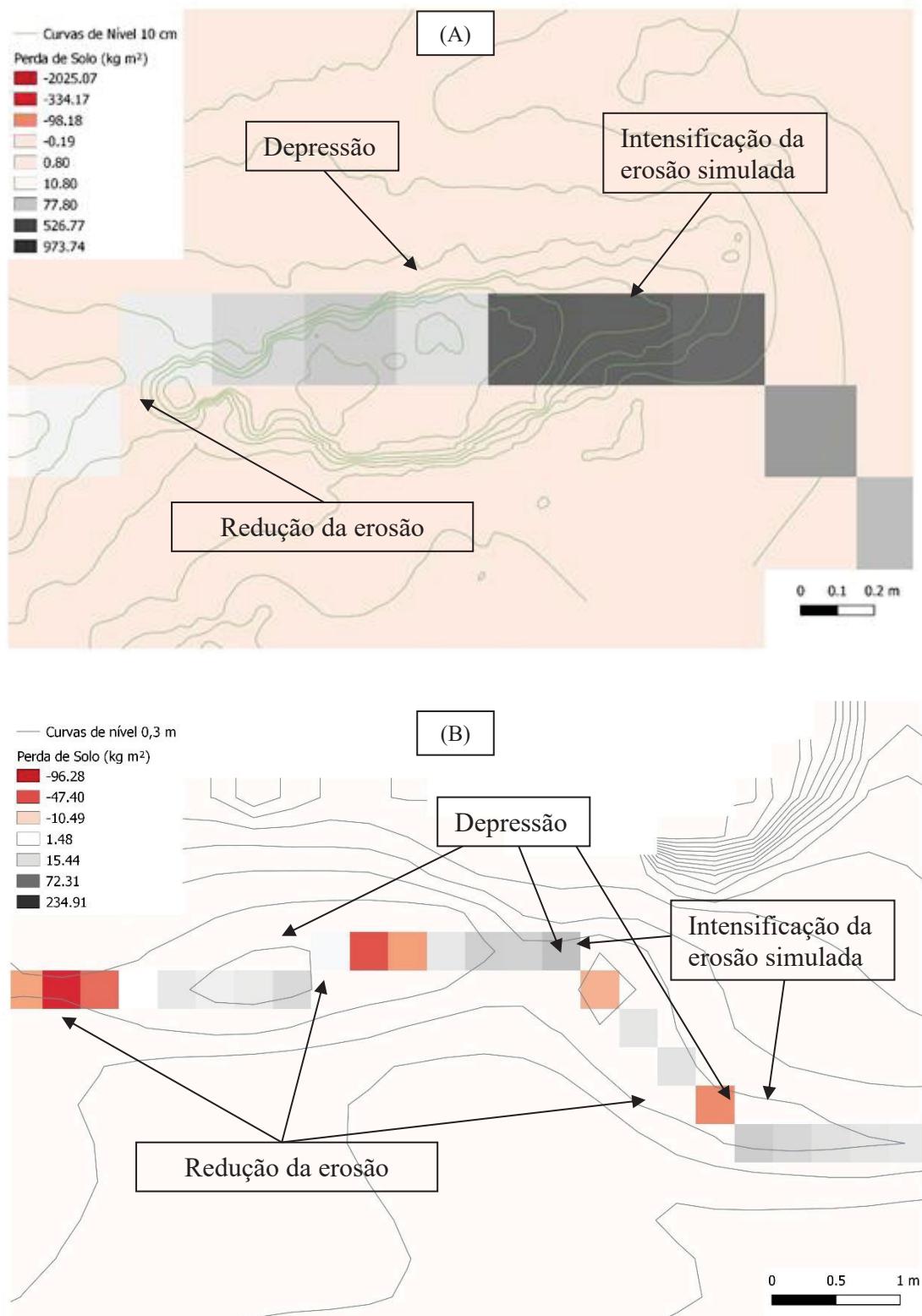
FIGURA 44 - EROSÃO E DEPOSIÇÃO DISTRIBUÍDA AO LONGO DA RAVINA LINDEIRA PARA O EVENTO 20. OCORREU ALTERNÂNCIA ENTRE EROSÃO E DEPOSIÇÃO NO INTERIOR DA RAVINA, ONDE OS PROCESSOS EROSIVOS FORAM MAIS INTENSOS.



As mudanças que ocorrem nas ravinas ao longo de eventos maiores podem ser bem exemplificadas no Evento 20. Vazão reduzida no início do evento indica o efeito da umidade inicial do solo e depressões na dinâmica do escoamento das ravinas. De forma geral, foi necessário grande quantidade de chuva para ocorrer escoamento expressivo no ponto de monitoramento nas ravinas analisadas. A menor intensidade de precipitação no início do evento contribui para maior infiltração da água da chuva. Após o início do escoamento, a resposta às variações na precipitação das feições analisadas se tornou mais rápida, uma vez que o solo e as depressões estavam saturados de água.

Foi observada alternância entre erosão e deposição de sedimentos no interior das ravinas com os resultados distribuídos de erosão e deposição (FIGURA 45a e 45b). Nas depressões, predominou intensificação da erosão, onde modelou-se a intensificação da erosão na queda do jato de água seguida de uma zona de deposição, em que a menor energia não conseguiu transportar as partículas de solo no relevo mais plano.

FIGURA 45 - SOBREPOSIÇÃO DE RESULTADO DISTRIBUÍDO DE: (A) PERDA DE SOLO NA RAVINA COM *PINUS* PARA O EVENTO 20 JUNTAMENTE COM CURVAS DE NÍVEL COM EQUIDISTÂNCIA DE 0,1 M; E (B) PERDA DE SOLO NA RAVINA LINDEIRA PARA O EVENTO 20 JUNTAMENTE COM CURVAS DE NÍVEL COM EQUIDISTÂNCIA DE 0,3 M. A FIGURA INDICA A INTENSIFICAÇÃO DA EROSÃO NA ENTRADA DA DEPRESSÃO E A REDUÇÃO DA EROSÃO À JUSANTE.



6.4. DISCUSSÃO

A aplicação do modelo openLISEM em ravinas de estradas não pavimentadas na área de estudo forneceu resultados com coeficientes NSE de vazão positivos, mas erros na consideração da produção de sedimentos fizeram com que o modelo superestimasse os resultados monitorados. Outros estudos já aplicaram o modelo openLISEM no Brasil, obtendo-se bons resultados para bacias hidrográficas (MAGANO *et al.*, 2016) e trechos de estradas não pavimentadas (SCHULTZ, 2013).

Segundo Oostwoud Wijdenes e Bryan (2001), o modelo openLISEM tende a apresentar maiores dificuldades para reproduzir os fenômenos hidrológicos de eventos de pequena magnitude, uma vez que pequenos montantes do deflúvio e produção de sedimentos tendem a ser influenciados de modo mais intenso por distorções produzidas por variações inerentes aos mecanismos erosivos. Os resultados do presente trabalho não permitem estabelecer um limiar entre a complexidade de simulação de eventos pequenos e grandes, uma vez que calibrações específicas para cada evento foram estabelecidas.

Um fator importante é a dificuldade na calibração ou o estabelecimento de um conjunto de valores dos parâmetros de entrada que produzissem resultados satisfatórios para o modelo, o que foi confirmado por Ma (2018), pois o modelo openLISEM pode ser bastante sensível para alguns parâmetros de difícil mensuração, como a umidade inicial do solo (SHEIKH *et al.*, 2010) ou a condutividade hidráulica saturada (DE ROO, OFFERMANS; CREMERS, 1996; STOLTE *et al.*, 2003; BAUMANN *et al.*, 2019).

Clutario e David (2014) realizaram estudos acerca da aplicabilidade do modelo openLISEM em uma grande bacia hidrográfica com altos índices pluviométricos nas Filipinas, concluindo que, apesar da dificuldade de se modelar eventos sucessivos distribuídos, o modelo conseguiu reproduzir satisfatoriamente o comportamento da descarga líquida, o que também foi comprovado com os resultados do presente trabalho. Os autores afirmam ainda que alguns parâmetros físicos de entrada do modelo podem se modificar ao longo dos eventos, o que pode ocasionar erros se forem mantidos valores fixos.

Utilizando o openLISEM, Baartman *et al.* (2011) concluíram que cada evento simulado pelo modelo necessitava de uma calibração exclusiva, uma vez que esses eventos produziam distintas respostas hidrológicas devido às diferentes magnitudes das precipitações consideradas, o que foi confirmado pelos resultados da presente pesquisa. Os autores também

indicam bons resultados para a erosão, o que vai de encontro aos baixos coeficientes NSE obtidos para a produção de sedimentos nos resultados do presente trabalho.

Takken *et al.* (1999) também encontraram superestimação da produção de sedimentos como o LISEM para áreas com considerável cobertura vegetal, além de problemas na simulação de depósitos de sedimentos à montante de barreiras vegetadas.

A presença da vegetação desenvolvida sobre o leito da estrada da Ravina com *Pinus* e a ocorrência de vegetação rasteira sobre as áreas entressulcos da Ravina Lindeira foram responsáveis pelo aumento do coeficiente de Manning, que variou entre 0,1 e 2 com maiores valores nos eventos mais recentes, quando a vegetação estava mais desenvolvida. Outro parâmetro que se alterou bastante foi a condutividade hidráulica saturada, que variou entre 0,1 e 16, sofrendo influência da vegetação.

Análises de sensibilidade realizadas com os parâmetros de entrada do modelo openLISEM indicaram que o parâmetro mais sensível do modelo é a condutividade hidráulica saturada (DE ROO, OFFERMANS; CREMERS, 1996; STOLTE *et al.*, 2003; BAUMANN *et al.*, 2019), seguida da rugosidade randômica. Contudo, as respostas do modelo sofrem influência da combinação de diferentes parâmetros de entrada (JETTEN; DE ROO; GUÉRIF, 1998), o que ressalta a importância da calibração do modelo por eventos.

A superestimação da produção de sedimentos na Ravina com *Pinus* pode também estar relacionada com processos que não são simulados pelo modelo openLISEM, mas que interferem nos resultados. O acúmulo de acículas no interior da ravina ocorre em diversos pontos ao longo do canal da feição erosiva e atua como barreira de sedimentos, promovendo deposição e consequentemente atuando como filtro, impedindo que as partículas fossem transportadas à jusante.

Os amontoados de material acumulados ao longo das estradas também podem representar importantes filtros que retém os sedimentos, acumulando-os e impedindo seu transporte (KING, 1979). Na Ravina com *Pinus* verificou-se que grandes quantidades de material orgânico se depositaram no leito da feição erosiva, dificultando o transporte de sedimentos encosta abaixo (FIGURAS 46a, 46b e 46c). Para a Ravina Lindeira, foram observados grandes acúmulos de sedimentos em alguns eventos de maior porte, inclusive no interior da calha H (FIGURA 46d).

FIGURA 46 - RAVINA COM *PINUS* ONDE OBSERVA-SE (A) A PRESENÇA DE ACÍCULAS NO INTERIOR DA CALHA H, COM DEPÓSITOS DE SEDIMENTOS EM SUAS IMEDIAÇÕES; (B) SOLO COBERTO COM ACÍCULAS NA SUPERFÍCIE DA ESTRADA AO REDOR DA RAVINA; (C) AMONTOADO DE ACÍCULAS EM UM ESTREITAMENTO DA RAVINA COM *PINUS*; E (D) CALHA H DA RAVINA LINDEIRA ENTUPIDA



Na Ravina Lindeira, os únicos acúmulos de material foram constituídos dos próprios sedimentos e fragmentos de rochas erodidos à montante e que se depositaram em locais de baixa energia de escoamento, formando depósitos menos eficientes no filtro de

sedimentos do que as grandes quantidades de acículas carreadas ao interior da Ravina com *Pinus*. O transporte dos sedimentos depende, nesses casos, principalmente da intensidade dos eventos de precipitação, que interferirá diretamente na vazão (RENGERS; TUCKER, 2014; BENNETT *et al.*, 2000).

Além das barreiras de acículas e de sedimentos, a granulometria do material erodido e transportado também depende da localização das diversas zonas de destacamento de sedimentos no interior das ravinas (ALVES, 2007), seja via erosão linear por escoamento concentrado ou mesmo por solapamento das paredes dos sulcos e erosão remontante da cabeceira (PIEST; BRADFORD; SPOMER, 1975).

A idade e o uso da estrada também condicionam a disponibilidade e o tamanho de partículas erodidas e transportadas (SHEIKH *et al.*, 2010; CASTILLO *et al.*, 2003; THOMAZ; PEREIRA, 2013). Processos biológicos, subsidências de solo e até mesmo a ação dos ventos podem impulsionar o processo de erosão no interior dos canais (ALVES, 2007), mecanismos de difícil mensuração e previsão, e que não são incorporados ao modelo openLISEM.

As partículas transportadas no interior das ravinas variaram bastante, desde sedimentos finos até grandes agregados de material mais resistente, que inclusive chegaram a entupir as calhas de monitoramento em alguns eventos de maior porte. A energia do escoamento, associada à turbulência ocasionada pela chuva, foi capaz de transportar inclusive fragmentos de rochas de tamanho considerável, dependendo da vazão considerada no experimento (POESEN; TORRI; BUNTE, 1994). A presença dos fragmentos depositados sobre o canal da ravina também não é considerada na simulação do modelo openLISEM.

Não foi identificada exaustão de sedimentos durante os eventos de precipitação, conforme relatou Piest, Bradford e Spomer (1975), apesar da superestimação da produção de sedimentos do modelo interferir sobre a análise. Não é descartada a hipótese de ocorrência de material particulado disponibilizado na superfície. Esse material foi observado nos experimentos de Piest, Bradford e Spomer (1975) e influenciou os resultados de produção de sedimentos monitorados.

O material particulado é disponibilizado durante o período sem chuva e se acumula na superfície, sendo carreado com os eventos de precipitação subsequentes, de modo que no início da primeira chuva, ocorre o transporte de uma parte desse sedimento à jusante, tendendo à exaustão após a limpeza da superfície (PIEST; BRADFORD; SPOMER, 1975; THOMAZ; PEREIRA, 2013; HEEDE, 1975).

As ravinas comportam tanto os sedimentos provenientes das zonas entressulcos quanto os gerados pela desestabilização e queda de suas paredes (observado nos resultados dos capítulos 1 e 2). Segundo Govers e Poesen (1988), a disponibilização de sedimentos é maior quando a chuva é antecedida de um longo período seco que promoveu a formação de rachaduras na superfície do solo. Os sedimentos transportados e depositados no interior das ravinas vão variar entre os eventos, dependendo das áreas fonte e dos processos erosivos associados.

Ravinas e voçorocas de maior porte tendem a transportar sedimentos a uma distância maior encosta abaixo. Entretanto, a maior parte do sedimento erodido em estradas não pavimentadas de encostas se deposita em distâncias menores, mesmo em feições erosivas lineares de grandes dimensões (KING, 1979). Verificou-se na modelagem que a Ravina Lindeira forneceu quantidade maior de sedimentos do que a Ravina com *Pinus*. A diferença na produção de sedimentos entre as ravinas tem relação com os diferentes parâmetros morfométricos e dimensões, propriedades do solo, condições de solo exposto e de vegetação (capítulo 1).

Um fator que influencia a erosão do solo e consequentemente a distribuição granulométrica das partículas residuais é a energia de ligação entre os constituintes da superfície, a chamada coesão do solo, a qual determina a energia com que as partículas se ligamumas às outras, sendo responsável pela resistência à erosão via *splash* e escoamento (MITCHELL; SOGA, 2005; MORGAN, 2005). A coesão foi medida e foi comprovadamente mais alta na Ravina Lindeira, o que foi incorporado às simulações. Mesmo assim, a produção de sedimentos dessa ravina foi maior, devido às variações entre os perfis de solo.

O openLISEM apresenta três modelos de cálculo da eficiência de desagregação do solo pelo escoamento empregando coesão do solo, sendo: o modelo proposto por Rauws e Govers (1988); o modelo proposto por Morgan *et al.* (1998) para o modelo EUROSEM; e o modelo concebido por Morgan (2001) para o modelo MMF. Na calibração, os resultados da equação de Morgan (2001) foram os que melhor reproduziram os dados monitorados da Ravina Lindeira, enquanto os de Rauws e Govers (1988) superestimaram os resultados de ambas as ravinas. A equação de Morgan *et al.* (1998), por sua vez, subestimou todos os resultados.

Além das condições de manejo, parâmetros morfométricos e propriedades do solo, as condições de estabilidade e instabilidade das feições se alteram de acordo as condições impostas pelos resultados da própria erosão. Mesmo sem alterações externas nos fatores que influenciam a dinâmica hidrogeomorfológica da ravina, o seu comportamento pode se modificar ao longo

do tempo como consequência da própria ação hidrogeomorfológica (SCHUMM, 1979), como exemplificado pela dinâmica intensa das depressões.

Os resultados obtidos com a modelagem no presente estudo concordam com Oostwoud *et al.* (2000), quando afirmam que as depressões (OLIVEIRA, 2007) ou *plunge pools* (STEIN; JULIEN, 1993) desenvolvem-se no leito de feições erosivas lineares, interferindo sobre a sua dinâmica erosiva, conforme demonstraram Robinson e Hanson (1994) e Bennett *et al.* (1997). Observou-se através da modelagem grande diferença entre a infiltração máxima dos eventos 6 e 9 para a Ravina com *Pinus* (6,09 e 41,03 mm, respectivamente) e para a Ravina Lindeira (11,94 e 112,42 mm), indicando maior influência das depressões em eventos com magnitude mais alta (maior do que 10 mm), quando o escoamento concentrado no interior das ravinas é relevante.

A alternância entre erosão intensa e deposição ocasiona mudanças na morfologia interna das ravinas, sem que necessariamente ocorra resposta no exutório da ravina à jusante. As depressões aumentam de tamanho, dependendo da turbulência do escoamento que incide sobre a área (STEIN; JULIEN, 1993; DIETRICH; DUNNE, 1993; ROBINSON; HANSON, 1994; BENNETT *et al.*, 1997). As variações evolutivas do modelado não podem ser simuladas no modelo openLISEM, devido à sua incapacidade de alterar o modelo digital do terreno original, sendo necessária a aplicação de outras metodologias para avaliação dos processos evolutivos.

6.5. CONCLUSÕES

As simulações empregando o modelo openLISEM forneceram resultados de escoamento consistentes em relação aos dados monitorados nas ravinas, permitindo a validação da modelagem. Os resultados de erosão não foram consistentes para a maioria dos eventos, onde o modelo sobreestimou os dados monitorados. A Ravina Lindeira apresentou escoamento e erosão simulados mais representativos do que a Ravina com *Pinus* para todos os eventos modelados.

A calibração do modelo openLISEM foi complexa e exclusiva para cada evento de precipitação, devido às diferentes respostas hidrológicas e evolução temporal dos parâmetros físicos e da cobertura vegetal das ravinas, dependendo da época de cada evento selecionado.

As maiores concentrações de escoamento e as maiores taxas de erosão e de infiltração foram simuladas no interior das ravinas, levando em conta as áreas de drenagem. Isso indica

que as feições erosivas intensificam a erosão em estradas não pavimentadas, gerando importantes mecanismos erosivos no contexto das encostas.

A dinâmica hidrogeomorfológica das ravinas baseou-se na alternância de erosão e deposição, principalmente nas depressões. A erosão intensa ocasionada pela energia do jato de água, o gasto de energia e a mudança na topografia do fundo da ravina promovem combinação de processos de destacamento e deposição de sedimentos, tornando as áreas passíveis de modificações mais rápidas e intensas em relação ao restante das ravinas.

Identificou-se valores maiores de infiltração também nas depressões. Os valores mais altos de infiltração estão relacionados com o armazenamento de água no interior dessas estruturas, acumulando o escoamento da área de contribuição à montante. O volume armazenado nas depressões fica disponível para infiltração após o término do escoamento. Maiores volumes de infiltração estão relacionados com eventos de precipitação com mais de 10 mm de magnitude, indicando que as depressões tendem a influenciar a dinâmica hidrogeomorfológica de eventos onde o escoamento concentrado é mais relevante.

7. CONCLUSÕES GERAIS

As ravinas formadas em estradas não pavimentadas são definidas inicialmente pela combinação entre parâmetros morfométricos, principalmente declividade da encosta e área de drenagem, determinando as larguras e profundidades. Outros fatores também exercem controle sobre as características das ravinas, como a presença de diferentes perfis do solo com distintas condições de coesão, granulometria e infiltração de água, e as condições da superfície, destacando-se o solo exposto e a compactação como elementos preponderantes para a intensificação do escoamento e da erosão.

O monitoramento de eventos de escoamento e de produção de sedimentos nas ravinas em diferentes condições de precipitação por meio de pluviômetro, calhas H, sensores de nível e turbidez forneceram resultados consistentes. Foi possível identificar que eventos com maiores magnitudes de precipitação e intensidade geralmente produzem mais escoamento e erosão em relação a eventos de menores proporções, denotando a relevância do regime pluviométrico sobre a erosão de ravinas.

A dinâmica hidrogeomorfológica das ravinas é influenciada pelas grandes depressões ou *plunge pools*, formadas ao longo dos canais pelo jato de água do patamar elevado que atinge a superfície inferior à jusante e promove erosão intensa, dependendo da magnitude do evento

de precipitação. As depressões foram simuladas com o openLISEM, sendo relacionadas com aumentos de infiltração e alternâncias entre erosão e deposição, o que tende a impor mudanças morfológicas mais rápidas sobre as ravinas.

A modelagem com o openLISEM forneceu resultados satisfatórios de escoamento, apesar dos coeficientes NSE obtidos serem negativos em alguns casos. A dinâmica da vazão foi bem prevista com o modelo, reproduzindo as respostas das ravinas sob calibrações exclusivas para cada evento. As simulações superestimaram significativamente a produção de sedimentos para as ravinas, mesmo com calibrações exclusivas, indicando dificuldade do modelo de reproduzir o comportamento erosivo das feições avaliadas.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAMS, A.D.; PARSONS, A.J.; WAINWRIGHT, J. Effects of vegetation change on interrill runoff and erosion, Walnut Gulch, southern Arizona. **Geomorphology**, v. 13, p. 37-48, 1995.
- AGISOFT. **Agisoft Metashape User Manual Professional Edition Version 1.5**. Agisoft LLC, 2019. Disponível em: <https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf> Acesso em: 21 jan. 2021.
- AL-DURRAH, M.M.; BRADFORD, J.M. Parameters for Describing Soil Detachment Due to Single Waterdrop Impact. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 4, p. 836-840, jul./ago. 1982.
- ALLEN, P.M.; ARNOLD, J.G.; AUGUSTE, L.; WHITE, J.; DUNBAR, J. Application of a simple headcut advance model for gullies. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, p. 202-217, jan. 2018.
- ALVES, R.R. **Monitoring of the erosive process and of the hidrological and sediments dynamics: a case study at Glória Farm in field zone of Uberlândia-MG**. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/16269/1/RRAAlvesDISPRT.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2019.
- ANDERSON, B.; POTTS, D.F. Suspended Sediment and Turbidity Following Road Construction and Logging in Western Montana. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 23, n. 4, p. 681-690, Agosto 1987.
- ANTONINO, A.C.D.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; SOUZA, E.S.; NETTO, A.M.; CARNEIRO, C.J.G.; MONTENEGRO, A.A.A. Determinação da condutividade hidráulica e da sorvidade de um solo com infiltrômetro a disco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, maio/ago. 2001.
- ARANA J.M. Estratégia para determinação da ondulação do geoide com uso do GPS/Nivelamento. In: KRUEGER, C.P.; RIBEIRO, S.R.A. **Série em Ciências Geodésicas**. v. 5. Curitiba: Imprensa Universitária UFPR, 2005. p. 111-122. Disponível em: <<http://www2.fct.unesp.br/docentes/carto/arana/EstrDetOndGeoide.pdf>> Acesso em: 06 dez. 2019.
- BAARTMAN, J.E.M.; JETTEN, V.G.; RITSEMA, C.J.; VENTE, J. Exploring effects of rainfall intensity and duration on soil erosion at the catchment scale using openLISEM: Prado catchment, SE Spain. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 7, p. 1304-1049, jun. 2011.
- BAUMANN, V.; BONADONNA, C.; CUOMO, S.; MOSCARIELLO, M. Modelling of erosion processes associated with rainfall-triggered lahars following the 2011 Cordon Caulle eruption (Chile). **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 390, 2019.

BENNETT, S.J.; ALONSO, C.V.; PRASAD, S.N.; ROMKENS, M.J.M. Dynamics os headcuts in upland concentrated flows. In: WANG, S.S.Y.; LANGENDOEN, E.J.; SHIELDS, F.D. (Ed.) **Management of landscapes disturbed by channel incision**. Mississipi: University of Mississippi, 1997. p. 510-515.

BENNETT, S.J. et al. Experiments on headcut growth and migration in concentrated flows typical of upland áreas. **Water Resources Research**, v. 36, n. 7, p. 1911-1922, jul. 2000.

BENNETT, S.J.; WELLS, R.R. Gully erosion processes, disciplinary fragmentation, and technological innovation. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 44, n. 1, p. 46-53, 2019.

BEUSELINCK, L.; STEEGEN, A.; GOVERS, G.; NACHTERGAELE, J.; TAKKEN, I.; POESEN, J. Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt. **Geomorphology**, v. 32, n. 1-2, p. 69-82, fev. 2000.

BINGNER, R.L.; THEURER, F.D. **AnnAGNPS Technical Processes Documentation v. 3.2**. USDA, mar. 2005. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/AGNPS/PLModel/Document/Tech_Doc.PDF> Acesso em: 11 dez. 2020.

BINGNER, R.L.; THEURER, F.D.; YUAN, Y.; TAGUAS, E.V. **AnnAGNPS Technical Processes Documentation v. 5.5**. USDA, set. 2018. Disponível em: <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/AGNPS/downloads/AnnAGNPS_Technical_Documentation.pdf> Acesso em: 11 dez. 2020.

BINGNER, R.L.; WELLS. R.R.; MOMM, H.G.; RIGBY, J.R.; THEURER, F.D. Ephemeral gully channel width and erosion simulation technology. **Nat Hazards**, v. 80, p. 1949-1966, 2016.

BURROUGHS, E.R.; KING, J.G. **Reduction of Soil Erosion on Forest Roads**. Ogden: Intermountain Research Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, 1989. General Technical Report.

BOS, M.G. **Discharge Measurement Structures**. Working Group on Small Hydraulic Structures. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, 1976.

BOSCH, J.M. Treatment Effects on Annual and Dry Period Streamflow at Cathedral Peak. **South African Forestry Journal**, v. 108, n. 1, p. 29-38, 1979.

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

BRAKENSIEK, D.L.; OSBORN, H.B.; RAWIS, W.J. **Field manual for research in agricultural hydrology**. Agriculture Handbook n. 224. US Department of Agriculture, 1979.

BRINSON, M. M. **A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands.** Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-4. U.S. Army Corps of Engineers, 1993.

BRUIJNZEEL, L.A. **Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review.** Amsterdam: UNESCO/International Association for Hydrological Science, 1990.

CAROLLO, F.G.; STEFANO, C.D.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. Measuring rill erosion at plot scale by a drone-based technology. **Hydrological Processes**, v. 29, p. 3802-3811, 2015.

BRYAN, R.B. Erosional response to variations in interstorm weathering conditions. In: ANDERSON, M.G.; BROOKS, S.M. **Advances in hillslope processes: volume 1.** Chichester/UK: John Wiley & Sons, 1996. p.589-612.

BRYAN, R.B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. **Geomorphology**, v. 32, p. 385-415, mar. 2000.

CAMPOS, É.P. de. et al. Florística e estrutura horizontal da vegetação arbórea de uma ravina em um fragmento florestal no município de Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, 2006.

CARVALHO, D.F. de. et al. Water erosion and soil water infiltration in different stages of corn development and tillage systems. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 19, n. 11, p. 1072-1078, Nov. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662015001101072&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 17 abril 2020.

CASALÍ, J.; LÓPEZ, J.J.; GIRÁLDEZ, J.V. Ephemeral gully erosion in Southern Navarra (Spain). **Catena**, v.36, n. 1-2, p. 65-84, 1999.

CASTILLO, V.M.; GOMEZ-PLAZA, A.; MARTINEZ-MENA, M. The Role of Antecedente Soil Water Content in the Runoff Response of Semiarid Catchments: a Simulation Approach. **Journal of Hydrology**, v. 284, n. 1-4, p. 114-130, 2003.

CAVICHOLO, S.R. **Perdas de Solo e Nutrientes por Erosão Hídrica em Diferentes Métodos de Preparo do Solo em Plantio de *Pinus Taeda*.** 2005. 139 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_dr/2005/t191_0216-D.pdf> Acesso em: 26 maio 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais.** São Paulo: Edgard Büchler, 1999.

CHRISTOFOLETTI, S.R.; MORENO, M.M.T. Granulometria por difração a laser e sua relação com a faciologia das rochas argilosas da Formação Corumbataí-SP. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, jul./set. 2017.

CHUQUIPIONDO, I.G.V. **Avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade de solos nas margens de cursos de água: estudo de caso trecho de vazão reduzida Capim Branco I Araguari Minas Gerais.** Tese (Doutorado em Meio Ambiente) - Programa de Pós-Graduação

em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/265M.PDF>> Acesso em: 29 nov. 2019.

CLUTARIO, M.V.A.; DAVID, C.P.C. Event-Based Soil Erosion Estimation in a Tropical Watershed. **International Journal of Forest, Soil and Erosion**, v. 4, n. 2, p. 51-57, maio 2014. Disponível em: <[http://www.ijfse.com/uploadedfiles/IJFSEArchive/IJFSE2014/4\(2\)/04.pdf](http://www.ijfse.com/uploadedfiles/IJFSEArchive/IJFSE2014/4(2)/04.pdf)> Acesso em: 06 jan. 2021.

CORRÊA, C.M.C.; DEDECEK, R.A. Erosão real e estimada através da RUSLE em estradas de uso florestais, em condições de relevo plano a suave ondulado. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 381-391, abr./jun. 2009.

COULTHARD, T.J.; HANCOCK, G.R.; LOWRY, J.B.C. Modelling soil erosion with a downscaled landscape evolution model. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 37, n. 10, p. 1046-1055, 2012.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa geológico do estado de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17996?show=full>> Acesso em: 01 Set. 2020.

CROKE, J.; MOCKLER, S. Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, southeastern Australia. **Earth Surface Processes and Landforms**, Special Issue: Hydrologic and Geomorphic Effects of Forest Roads, v. 26, n. 2, p. 205-217, fev. 2001.

CUNHA, A.A.; ALIXANDRINI JR, M.J.; FERNANDES, V.O. Avaliação de erosão por imagens de aeronave remotamente pilotada a baixa altura de voo. **Geografia**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 191-210, 2020.

DABA, S.; RIEGER, W.; STRAUSS, P. Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques. **Catena**, v. 50, p. 273-291, 2003.

DELONG, S.B.; JOHNSON, J.P.L.; WHIPPLE, K.X. Arroyo channel head evolution in a flash-flood-dominated discontinuous ephemeral stream system. **Geological Society of America Bulletin**, v. 126, n. 11/12, p. 1683-1701, nov./dez. 2014.

DE PLOEY, J. A model for headcut retreta in rills and gullies. In: YAIR, A.; BERKOWICZ, S. (Ed.) **Arid and semi-arid environments: geomorphological and pedological aspects**. Catena supplement 14, 1989. p.81-86.

DE ROO, A.P.J.; WESSELING, C. G.; RITSEMA, C. J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output. **Hydrological processes**, v. 10, n. 8, p. 1107-1117, 1996. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291099-1085%28199608%2910%3A8%3C1107%3A%3AAID-HYP415%3E3.0.CO%3B2-4>> Acesso em: 07 out. 2019.

DE ROO, A.P.J.; OFFERMANS, R.J.E.; CREMERS, N.H.D.T.; LISEM: a single-event physically-based hydrological and soil erosion model for drainage basins: II. Sensitivity analysis, validation and application. **Hydrological Process.**, v. 10, p. 1119 – 1126, 1996.

DEMARCHI, L. C.; RABELLO, L. R.; SANTOS, N. B. DOS; FRANCO, O.; CORREA, R. O. **Adequação de Estradas Rurais**. Campinas: CATI, 2003.

DESTA, L.; ADUGNA, B. **A field guide on gully prevention and control**. Addis Ababa/Ethiopia: Nile Basin Initiative Eastern Nile Subsidiary Action Program (ENSAP), 2012. 67 p. Disponível em: <http://www.bebuffered.com/downloads/ManualonGullyTreatment_TOTFinal_ENTRO_TBI_WRDP.pdf> Acesso em: 06 dez. 2019.

DIETRICH, W.E.; DUNNE, T. Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. **Z. Geomorph.**, N. F. Suppl., Berlim, v. 29, p. 191-206, Set. 1978.

DIETRICH, W.E.; DUNNE, T. The Channel Head. In: BEVEN, K.; KIRKBY, M.J. (Ed.) **Channel Network Hydrology**. John Wiley and Sons Ltd., 1993. p. 175-219.

DOUGLAS, I.; SPENCER, T.; GREER, T.; BIDIN, K.; SINUN, W.; MENG, W.W. The impact of selective commercial logging on stream hydrology, chemistry and sediment loads in the Ulu Segama rain forest, Sabah, Malaysia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Science**, v. 335, p. 397-406, 1992.

DULEY, F.L. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, p. 60-64, 1939.

DUNNE, T.; BLACK, R.D. An Experimental Investigation of Runoff Production in Permeable Soils. **Water Resources Research**, v. 6, n. 2, p. 478-490, 1970.

EIJKELKAMP. **Manual Art. no. 0909 Tension infiltrometer**. Gieesbek/The Netherlands: Eijkelkamp Soil and Water, 2020. Disponível em: <<https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/tech-specs-tension-infiltrometer.html>> Acesso em: 27 nov. 2020.

ELLISON, W.D. Some Effects of Raindrops and Surface-Flow on Soil Erosion and Infiltration. **Transactions of American Geophysical Union**, v. 26, n. 3, p. 415-429, Dez. 1945.

EMBRAPA SOLOS. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Embrapa: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n. 46, 2004. Escala 1:250.000. Disponível em: <http://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1172&Itemid=543> Acesso em: 01 Set. 2020.

EVANS, R. Land use and accelerated soil erosion by water in a small catchment on the South Downs, West Sussex, England – past and presente. In: COWLEY, D.C.; STANDRING, R.A.; ABICHT, M.J. (Ed.) **Landscapes through the lens: aerial photographs and historic environment**. Oxford: Oxbow Books, 2010. p. 129-142.

FAVIS-MORTLOCK, D.T.; BOARDMAN, J.; PARSONS, A.J.; LASCELLES, B. Emergence and erosion: a model for rill initiation and development. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 2173-2205, ago. 2000.

FERNÁNDEZ-RAGA, M.; PALENCIA, C.; KEESSTRA, S.; JORDÁN, A.; FRAILE, R.; ANGULO-MARTÍNEZ, M.; CERDÀ, A. Splash Erosion: A review unanswered questions. **Earth-Science Reviews**, v. 171, p. 463-477, Ago. 2017.

FERREIRA, M.C. et al. Um modelo espacial baseado em método de classificação Fuzzy, aplicado ao mapeamento de risco à erosão. **Multidimensão e territórios de risco**, Coimbra, p. 95-100, 2014.

FLANAGAN, D.C.; GILLEY, J.E.; FRANTI, T.G. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, models capabilities, and future enhancements. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 5, p. 1603-1612, 2007.

FRANCISCO, A.B. A erosão de solos no Extremo Oeste Paulista e seus impactos no campo e na cidade. **Revista de Geografia, Meio Ambiente e Ensino**, v. 2, n. 2, p. 57-68, 2011. Disponível em: <<http://www.fecilcam.br/revista/index.php/geomae/article/view/46>> Acesso em: 06 dez. 2019.

FOSTER, G.R.; FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A.; LANE, L.J.; RISSE, L.M.; FINKNER, S.C. Hillslope erosion component. In: **WEPP: USDA-Water Erosion Prediction Project**. USDA ARS Lafayette, 1995. p. 11-12.

GARDNER, W.R. Some Steady-State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with application to evaporation from a water table. **Soil Sci.**, v. 85, p. 228-232, 1958.

GILMOUR, D.A.; GILMOUR, D.G. The Effects of Logging on Streamflow and Sedimentation in a North Queensland Rainforest Catchment. **The Commonwealth Forestry Review**, v. 50, n. 1, p. 39-48, março 1971. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/42604957?casa_token=2QjJBeru4FcAAAAAA:prYTZriu2Xg198JxTJ0OmPnuzg-3cz1RFuQhZk0nK8oQ6bYQ_7MRScbe-z-Pm-70AOePJJuAaQ3yFgk6lsImUxhNyhUyC8wjdOoL7UVIZ-x-IlhRA0DHg&seq=1#metadata_info_tab_contents> Acesso em: 26 maio 2020.

GARCIA, A. R. et al. Volume de enxurrada e perda de solo em estradas florestais em condições de chuva natural. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 535-542, 2003.

GUERRA, A.J.T. Ravinas: processo de formação e desenvolvimento. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 20, p. 9-26, 1997.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 3º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 17-50.

GUZHA, A.C.; RUFINO, M.C.; OKOTH, S.; JACOBS, S.; NÓBREGA, R.L.B. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 15, 2018. p. 49-67. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581817302161>>. Acesso em: 26 jan. 2021.

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M.; SANTOS, I. Hidrogeomorfologia: Princípios, Conceitos, Processos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 103-111, Abril/Jun. 2012.

GOMES, N.M.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; BESKOW, S. Aplicabilidade do LISEM (Limburg soil erosion) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, Viçosa, nov./dez. 2008.

GORDON, L.M.; BENNETT, S.J.; BINGER, R.L.; THEURER, F.D.; ALONSO, C.V. Simulating Ephemeral Gully Erosion in AnnAGNPS. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, p. 857-866, 2007.

GOVERS, G. Selectivity and Transport Capacity of Thin Flows in Relation to Rill Erosion. **Catena**, Braunschweig, v. 12, p. 35-49, 1985.

GOVERS, G. Initiation of motion in Overland flow. **Sedimentology**, v. 34, n. 6, p. 1157-1164, Dez. 1987.

GOVERS, G.; LOCH, R.J. Effects of initial water content and soil mechanical strength on the runoff erosion resistance of clay soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 31, p. 549-566, 1993.

GOVERS, G.; POESEN, J. Assessment of the Interrill and Rill Contributions to Total Soil Loss From an Upland Field Plot. **Geomorphology**, v. 1, p. 343-354, 1988.

GRAF, W.L. The rate law in fluvial geomorphology. **American Journal of Science**, v. 277, p. 178-191, fev. 1977.

GUO, Y.; PENG, C.; ZHU, Q.; WANG, M.; WANG, H.; PENG, S.; HE, H. Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: Model applications, limitations and future challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 250, p. 1-12, 2019.

GUTIERREZ, J.; HERNANDEZ, I.I. Runoff and interrill erosion as affected by grass cover in a semi-arid rangeland of northern Mexico. **Journal of Arid Environments**, v. 34, n. 3, p.287-295, nov. 1996.

HANCOCK, G.R.; EVANS, K.G.; McDONNELL, J.; HOPP, L. Ecohydrological controls on soil erosion and landscape evolution. **Ecohydrology**, v. 5, n. 4, p. 478-490, jul. 2012.

HEEDE, B.H. Stages of Development of Gullies on the West. In: USDA SEDIMENTATION LABORATORY. **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. Publication ARS-S-40. Oxford, Mississipi: USDA-ARS, Jun. 1975. p. 155–161.

HESSEL, R.; ASCH, T.V. Modelling gully erosion for a small catchment on the Chinese Loess Plateau. **Catena**, v. 54, p. 131-146, 2003.

HOGG, S.E. Sheetfloods, sheetwash, sheetflow, or ...? **Earth-Science Reviews**, v. 18, p. 59-76, fev. 1982.

HOLTAN, H.N.; MINSHALL, N.E.; HARROLD, L.L. **Field Manual for Research in Agricultural Hydrology.** Agriculture Handbook No. 224, United States Department of Agriculture, Jun. 1962.

HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Trans. Am. Geophys. Un.**, v. 14, p. 446-460, 1933.

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

HOWARD, A.D. A detachment-limited model of drainage basin evolution. **Water Resources Research**, v. 30, n. 7, p. 2261-2285, jul. 1994.

HOWARD, A.D. Simulation of gully erosion and bistable landforms, In: DARBY, S.E.; SIMON, A. (Ed.) **Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering, and Management.** New York: John Wiley and Sons, 1999. p. 277-299.

HUNG, M.N.W.B. et al. Levantamento com Veículo Aéreo Não Tripulado para Geração de Modelo Digital do Terreno em Bacia Experimental com Vegetação Florestal Esparsa. **RA'E GA: o Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v. 43, p. 215-231, 2018. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/56621>> Acesso em: 12 out. 2019.

IMESON, A.C.; KWAAD, F.J.P.M. Gully types and gully prediction. **K.N.A.G. GeograFisch Tijdschrift XIV**, n. 5, 1980.

ISTANBULLUOGLU, E. et al. Implications of bank failures and fluvial erosion for gully development: Field observations and modeling. **Journal Of Geophysical Research**, v. 110, 2005.

JETTEN, V.; DE ROO, A.D.; GUÉRIF, J. Sensitivity of the Model LISEM to Variables Related to Agriculture. In: BOARDMAN, J.; FAVIS-MORTLOCK, D. (Ed.) **Modelling Soil Erosion by Water.** Oxford: NATO Scientific Affairs Division, 1998. p. 339-349.

JORGE, L.A. de C.; INAMASU, R.Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** Brasília: Embrapa, 2014. p. 109-134.

JULIEN, P.Y.; SIMONS, D.B. Sediment Transport Capacity of Overland Flow. **Transactions of the ASAE**, v. 28, p. 755-762, 1985.

KARYDAS, C.; PANAGOS, P. Towards an Assessment of the Ephemeral Gully Erosion Potential in Greece Using Google Earth. **Water**, v. 12, n. 2, p. 1-17, fev. 2020.

KEMPER, W.D.; MILLER, D.E. Management of Crusting Soils: Some Practical Possibilities. In: CARY, J.W.; EVANS, D.D. **Soil Crusts.** Arizona: Agricultural Experiment Station, University of Arizona, 1974. p. 1-6.

KING, J.G. Fill Slope Erosion From Forest Roads. In: Annual Meeting, 34º, Idaho, 1979. **Anais...** Idaho: Pacific Northwest Region, American Society of Agricultural Engineers, 1979.

KITTREDGE, JOSEPH. **Forest influences: The effects of Woody Vegetation on Climate, Water, and Soil, with applications to the Conservation of Water and the Control of Floods and Erosion.** Nova Iorque, Toronto, Londres: McGraw-Hill Book Company Inc., 1948.

KNISEL, W.G. (Ed.) **CREAMS: A field-Scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems.** U.S. Report n. 26. Department of Agriculture, Conservation Research, 1980.

KWAAD, F.J.P.M.; MUCHER, H.J. Degradation of soil structure by welding – a micromorphological study. **Catena**, v. 23, p. 253-268, 1994.

LAFAYETTE, K.P.V.; CANTALICE, J.R.B.; COUTINHO, R.Q. Resistência à erosão em ravinas, em latossolo argiloarenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, Nov./Dez. 2011.

LAWLER, D.M. A New Technique for the Automatic Monitoring of Erosion and Deposition Rates. **Water Resources Research**. v. 27, n. 8, p. 2125-2128, ago. 1991.

LEWIS, J. Turbidity-controlled sampling for suspended sediment load estimation. In: BOGEN, J.; FERGUS, T.; WALLING, D.E. **Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances.** n. 283. Wallingford: IAHS Press, 2003. p. 13-20.

LEONARD, R.A.; KNISEL, W.G.; STILL, D.A. GLEAMS: groundwater loading effects of agricultural management systems. **Transactions of the ASAE**, v. 30, n. 5, p. 1403-1418, 1987.

LOTKA, A.J. **Elements of Physical Biology.** Baltimore/EUA: Willians & Wilkins Company, 1925.

LOWRY, J.B.C. et al. Assessing soil erosion on a rehabilitated landform using the CAESAR landscape evolution model. In: FOURIE, A.B.; TIBBETT, M.; BEERSING, A. **Proceedings of the Sixth International Conference on Mine Closure.** Perth/Austrália: Australian Centre for Geomechanics, 2011. p. 613-621

LUCE, C.; BLACK, T.A. Sediment production from forest roads in western Oregon. **Water Resources Research**, v. 35, n. 8, p. 2561-2570, 1999.

LUK, S. Effect of Antecedent Soil Moisture Content on Rainwash Erosion. **Catena**, Braunschweig, v. 12, p. 129-139, 1985.

LUZ, C.C.; ANTUNES, A.F.B. Validação da tecnologia VANT na atualização de bases de dados cartográficos geológicos—estudo de caso: sistema cárstico do Rio João Rodrigues. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 67, p. 1439-1452, 2015.

MA, C. **Comparing and Evaluating Two Physically-Based Models: OpenLISEM and Scoops3d, for Landslide Volume Prediction.** 2018. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Geoinformação e Observação da Terra) – Faculty of Geo-Information Science and Earth

Observation, University of Twente, Enschede/The Netherlands, 2018. Disponível em: <https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2018/msc/aes/ma.pdf> Acesso em: 06 jan. 2021.

MACHADO, C. C.; GARCIA, A. R.; SILVA, E.; FONTES, A. M. Comparação de Taxas de Erosão em Estradas Florestais Estimadas pelo Modelo Wepp (Water Erosion Prediction Project) Modificado em Relação a Medições Experimentais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 295-300, 2003.

MAGANO, D.A.; MENEGAES, J.F.; MACHADO, M.R.R.; GONÇALVES, M.F. Modelagem de diferentes cenários utilizando o software openLISEM na bacia hidrográfica de Arvorezinha/RS. **Revista Científica Rural-Urcamp**, Bagé/RS, v. 18, n. 1, 2016.

MARINI, F. M.; PICCOLO, M. C. Hidrogeomorfología de la cuenca del río Quequén Salado, Argentina. **Investigaciones Geográficas**, n. 37, p. 59-71, 2005. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwj0s8rP0KHmAhUoDbkGHWN_Cm8QFjAAegQIBRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.cervant.esvirtual.com%2FdescargaPdf%2Fhidrogeomorfologa-de-la-cuenca-del-ro-quequn-salado-argentina-0%2F&usg=AOvVaw0idt1ItnPRjnKGrQLINedJ> Acesso em: 06 dez. 2019.

MARTINS, B.; LOURENÇO, L.; LIMA, H.R. Ação antrópica e risco de ravinamento: o exemplo da ravina do Corgo (rio Alva). **Territorium**, n. 24, p. 221-234, 2017.

MARZOLFF, I.; POESEN, J. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. **Geomorphology**, v. 111, p. 48-60, 2009.

MCINTYRE, D.S. Soil Splash and The Formation of Surface Crusts by Raindrop Impact. **Soil Science**, v. 85, p. 261-266, 1958.

MEGAHAN, W.F.; KIDD, W.J. **Effect of Logging Roads on Sediment Production Rates in the Idaho Batholith**. Ogden, Utah: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972.

MERRITT, W.S.; LETCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, p. 761-799, out./nov. 2003.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2005.

MOEYERSONS, J. Ravine formation on steep slopes: Forward versus regressive erosion. Some case studies from Rwanda. **Catena**, v. 18, n. 3-4, p. 309-324, Junho/Ago. 1991.

MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E. Source Areas, Drainage Density, and Channel Initiation. **Water Resources Research**, v. 25, n. 8, p. 1907-1918, ago. 1989.

MONTGOMERY, D.R. Road surface drainage, channel initiation, and slope instability. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1925-1932, Junho 1994.

MORGAN, R.P.C. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan-Morgan-Finney model. **Catena**, v. 44, p. 305-322, 2001

MORGAN, R.P.C. **Soil Erosion And Conservation**. 3 ed. Blackwell Publishing, 2005.

MORGAN, R.P.C.; QUINTON, J.N.; SMITH, R.E.; GOVERS, G.; POESEN, J.W.A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M.E. The European Soil Erosion Model (Eurosem): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 23, p. 527-544, 1998.

MORO, M. **Avaliação do modelo LISEM na simulação dos processos hidrossedimentológicos de uma pequena bacia rural localizada nas encostas basálticas do Rio Grande do Sul**. 2011. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/34138>> Acesso em 11 dez. 2020.

NACHTERGAELE, J.; POESEN, J. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. **European Journal of Soil Science**, v. 53, n. 3, p. 449-463, set. 2002.

NACHTERGAELE, J.; POESEN, J.; SIDORCHUK, A.; TORRI, D. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 1935-1953, 2002. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/hyp.392>> Acesso em 31 Agosto 2020.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, n. 3, pg. 282-290, 1970. Disponível em:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>> Acesso em 30 Jan. 2019.

NICHOLS, M.H.; NEARING, M.A.; POLYAKOV, V.O.; STONE, J.J. A sediment budget for a small semiarid watershed in southeastern Arizona, USA. **Geomorphology**, v. 180–181, p. 137–145, jan. 2013.

NICHOLS, M.H. et al. Monitoring channel head erosion processes in response to an artificially induced abrupt base level change using time-lapse photography. **Geomorphology**, v. 265, p. 107-116, 2016.

NYSSEN, J.; POESEN, J.; MOEYERSONS, J.; LUYTEN, E.; VEYRET-PICOT, M.; DECKERS, J.; HAILE, M.; GOVERS, G. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 27, p. 1267-1283, 2002.

OLIVEIRA, M.A.T. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 3º edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

OLIVEIRA, J.F.; GRIEBELER, N.P.; CORRECHEL, V.; SILVA, V.C. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de**

Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, p. 955-960, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000700019>> Acesso em 01 Jul. 2018.

OLIVEIRA, L.C. de. et al. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica em uma estrada florestal na serra catarinense. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 3, p. 655-665, set. 2015. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/19616>>. Acesso em: 26 maio 2020.

OOSTWOUDE WIJDENES, D.J.; POESEN, J.; VANDEKERCKHOVE, L.; GHESQUIERE, M. Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. **Catena**, v. 39, p. 147-167, 2000.

OOSTWOUDE WIJDENES, D.J.; BRYAN, R. Gully-head erosion processes on a semi-arid valley floor in Kenya: a case study into temporal variation and sediment budgeting. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, n. 9, p. 911-933, ago. 2001.

SHIELDS, A. **Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement**. Tradução de: OTT, W.P.; UCHELEN, J.C. Report n. 167, Pasadena/California: Soil Conservation Service, California Institute of Technology, 1936. Título original: Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung.

OpenLISEM Documentation & User Manual. University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, 2018. Disponível em <<https://blog.utwente.nl/lisem/download/>> Acesso em: 18 dez. 2020.

PANABOKKE, C.R.; QUIRK, J.P. Effect of initial water content on stability of soil aggregates in water. **Soil Science**, v. 83, p. 185-196, mar. 1957.

PATTON, P.C.; SCHUMM, S.A. Gully erosion: Northwestern Colorado: a threshold phenomenon. **Geology**, v. 3, n. 2, p. 88-90, 1975.

PAZ, O.L.S.; SAMPAIO, T.V.M. Geração de modelo digital do terreno e extração de parâmetros geomorfométricos a partir de dados coletados por aeronaves remotamente pilotadas. **Revista Cerrados**, v. 17, n. 2, p. 247-264, dez. 2019.

PIEST, R.F.; BRADFORD, J.M.; SPOMER, R.G. Mechanisms of Erosion and Sediment Movement from Gullies. In: USDA SEDIMENTATION LABORATORY. **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. Publication ARS-S-40. Oxford, Mississipi: USDA-ARS, Jun. 1975. Disponível em: <<https://archive.org/details/presentprospecti40sedi/page/52>> Acesso em: 13 abril 2019.

POESEN, J.W.; TORRI, D.; BUNTE, K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. **Catena**, v. 23, p. 141-166, 1994.

POESEN, J.; VANDAELE, K.; VAN WESEMAEL, B. Gully erosion: importance and model implications. In: BOARDMAN, J.; FAVIS-MORTLOCK, D.T. (Ed.) **Modelling Soil Erosion by Water**. NATO-ASI Series, I-55. Berlim: Springer-Verlag, 1998. p.285-311.

POESEN, J. et al. Gully Erosion in Dryland Environments. In: BULL, L.J.; KIRKBY, M.J. **Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels**. John Wiley and Sons Ltd, 2002.

POESEN, J. et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91-133, 2003.

POESEN, J. Challenges in Gully Erosion Research. **Landform Analysis**, v. 17, p. 5-9, 2011.

PORTOCARRERO, H.; ANDRADE, A.G.; CAMPOS, T.M.P. Monitoramento Automatizado do Escoamento Superficial em Parcela Experimental Instalada em Talude de Corte. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n. 30, p. 277-304, 2017.

RAUWS, G.; GOVERS, G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. **Journal of Soil Science**, v. 39, p. 111-124, 1988.

REID, L.M.; DUNNE, T. Sediment production from forest road surfaces. **Water Resources Research**, v. 20, n. 11, p. 1753-1761, nov. 1984.

RENGERS, F.K.; TUCKER, G.E. Analysis and modeling of gully headcut dynamics, North American high plains. **J. Geophys. Res. Earth Surf.**, v. 119, p. 983-1003, 2014. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2013JF002962>> Acesso em: 20 maio 2020.

REY, F. Influence of Vegetation Distribution on Sediment Yield in Forested Marly Gullies. **Catena**, v. 50, p. 539-562, Jan. 2003.

ROBINSON, K.M.; HANSON, G.J. A deterministic headcut advance model. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 37, p. 1437-1443, 1994.

RODZIK, J.; FURTAK, T.; ZGLOBICKI, W. The impact of snowmelt and heavy rainfall runoff on erosion rates in a gully systems, Lublin Upland, Poland. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1938-1950, Out. 2009.

SANTOS, C.A.; SOBREIRA, F.G.; COELHO NETO, A.L. Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto – MG. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 55, n. 4, out./dez. 2002.

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**. 2009. 167 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/92207>> Acesso em: 06 dez. 2019.

SANTOS, G.G.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v. 14, n. 2, Fev. 2010.

SANTOS, J.C.N. dos.; ANDRADE, E.M. de.; PALÁCIO, H.A.Q.; NETO, J.R.A.; RIBEIRO FILHO, J.C. **Erosive Process Control in the Brazilian Semiarid Region**. Ver. Caatinga,

Mossoró, v.31, n.3, p.695-703, jul.-set. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/6767/pdf>> Acesso em: 08 jul. 2020.

SCHEIDECKER, A. E. Hydrogeomorphology. **Journal of Hydrology**, n. 20, p. 193-215, 1973.

SCHOLTEN, T. Hydrology and Erodibility of the Soils and Saprolite Cover of the Swaziland Middleveld. **Elsevier Soil Technology**, v. 11, p. 247-262, 1997.

SCHULTZ, G.B. **Avaliação do processo de produção de sedimentos em um trecho de estrada não pavimentada**. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Curso de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <<http://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/36540>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

SCHULTZ, G.B. **Conectividade Hidrossedimentológica em Bacias Experimentais Embutidas**. 2017. 118 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <<https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/trabalhoConclusaoWS?idpessoal=10423&idprograma=40001016035P1&anobase=2017&idtc=1344>> Acesso em: 16 Abril 2020.

SCHUMM, S.A. Geomorphic thresholds: the concept and its applications. **Transactions of the Institute of British Geographers**, New Series v. 4. p. 485–515, 1979.

SHAFER, D. J.; YOZZO, D. J. **National Guidebook for Application of Hydrogeomorphic Assessment to Tidal Fringe Wetlands**. Vicksburg/Mississippi: Wetlands Research Program, 1998. Technical Report WRP-DE-16.

SHEIKH, V. et al. Sensitivity of LISEM predicted catchment discharge to initial soil moisture content of soil profile. **Journal of Hydrology**, v. 393, n. 3, p. 174-185, 2010.

SIDLE, R.C.; ONDA, Y. Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. **Hydrological Processes**, v. 18, p. 597-602, 2004.

SIDLE, R.C.; SASAKI, S.; OTSUKI, M.; NOGUCHI, S.; NIK, A.R. Sediment pathways in a tropical forest: effects of logging roads and skid trails. **Hydrological Processes**, Special Issue: Hydrogeomorphology, v. 18, p. 703-720, Março 2004.

SIDLE, R.C.; ZIEGLER, A.D. The dilemma of mountain roads. **Nature Geoscience**, v. 5, p. 437-438, jul. 2012.

SIDORCHUK, A. Stochastic Components in the Gully Erosion Modelling. **Catena**, v. 63, p. 299-317, 2005.

SMETTEM, K.R.J.; CLOTHIER, B.E. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters. **Journal of Soil Science**, v. 40, p. 563-568, 1989.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of Soil Science Terms**. Madison, Wisconsin: Soil Science Glossary Terms Committee, 2008.

SOROOSHIAN, S. Parameter Estimation, Model Identification, and Model Validation: Conceptual-Type Models. In: BOWLES, D.S.; O'CONNELL, P.E. **Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems**. Kluwer Academic Publishers, 1991.

STEIN, O.R.; JULIEN, P.Y.; ALONSO, C.V. Mechanics of jet scour downstream of a headcut. **Journal of Hydraulic Research**, v. 31, p. 723-738, Out. 1993.

STEIN, O.R.; JULIEN, P.Y. Criterion delineating the mode of headcut migration. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 119, n. 1, jan. 1993.

STOLTE, J.; LIU, B.; RITSEMA, C.J.; ELSEN, H.G.M.V.D.; HESSEL, R. Modelling water flow and sediment processes in a small gully system on the Loess Plateau in China. **Catena**, v. 54, p. 117-130, nov. 2003.

TAKKEN, I.; BEUSELINCK L, NACHTERGAELE, J.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DEGRAER, G. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). **Catena**, v. 37, p. 431-447, 1999. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00031-4)>. Acesso em: 22 Ago. 2019.

TELLES, T.S.; GUIMARAES, M.F.; DECHEN, S.C.F. The costs of soil erosion. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 287-298, Abr. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832011000200001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 Maio 2020.

THOMAZ, E.L. Runoff and sediment transport in a degraded area. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 243-252, 2012.

THOMAZ, E.L.; ANTONELI, V. Erosão e degradação do solo em área cultivada com erva-mate (*ilex paraguariensis*), Guarapuava – PR. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 21-30, 2008.

THOMAZ, E.L.; PEREIRA, A.A. Estrada rural não pavimentada como fonte de escoamento superficial e sedimento. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 1, 2013. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/212>> Acesso em: 04 dez. 2019.

THOMÉ, V.M.R.; ZAMPIERI, S.; BRAGA, H.J.; PANDOLFO, C.; SILVA JÚNIOR, V.P. da.; BACIC, I.; LAUS NETO, J.; SOLDATELI, D.; GEBLER, E.; ORE, J.D.; ECHEVERRIA, L.; MATTOS, M.; SUSKI, P.P. **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico de Santa Catarina**. v.1000, p.1000. Florianópolis: Epagri, 1999.

TORRI, D.; POESEN, J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. **Earth-Science Reviews**, v. 130, p. 73-85, 2014.

TRIMBLE, S. W. Changes in Sediment Storage in the Coon Creek Basin, Driftless Area, Wisconsin, 1853 to 1975. **Science**, v. 214, n. 4517, p. 181–183, 1981.

TROFIMOV, A.M.; MOSKOVKIN, M. The dynamic models of geomorphological systems (the qualitative theory of dynamic systems' application). **Z. Geomorph. N. F.**, Berlin/Stuttgart, v. 28, n. 1, p. 77-94, 1984.

TUCCI, C.E.M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 2001.

UEHARA, G.; JONES, R.C. Bonding Mechanisms for Soil Crusts: Part I. Particle Surfaces and Cementing Agents. In: CARY, J.W.; EVANS, D.D. **Soil Crusts.** Arizona: Agricultural Experiment Station, University of Arizona, 1974. p. 17-27.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, p. 132-153, 2005.

VANDAELE, K.; POESEN, J.; MARQUES DA SLVA, J.R.; DESMET, P. Rates and predictability of ephemeral gully erosion in two contrasting environments. **Géomorphologie: Relief, processus, environment**, n. 2, p. 83-96, 1996.

VANMAERCKE, M.; POESEN, J.; VAN MELE, B.; DEMUZERE,M.; BRUYNSEELS, A.; GOLOSOV, V.; BEZERRA, J.F.R.; BOLYSOV, S.; DVINSKIH, A.; FRANKL, A.; FUSEINA, Y.; GUERRA, A.J.T.; HAREGEWEYN, N.; IONITA, I.; IMWANGANA, F.M.; MOEYERSONS, J.; MOSHE, I.; SAMANI, A.N.; NIACSU, L.; NYSSEN, J.; OTSUKI, Y.; RADOANE, M.; RYSIN, I.; RYZHOV, Y.V.; YERMOLAEV, O. How fast do gully headcut retreat? **Earth-Science Review**, v. 154, p. 336-355, mar. 2016.

VANWALLEGHEM, T.; POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. **Geomorphology**, v. 69, p. 76-91, jul. 2005.

VIGIAK, O.; STERK, G.; ROMANOWICZ, R.; BEVEN, K.J. A semi-empirical model to assess uncertainty of spatial patterns of erosion. **Catena**, v. 66, p. 198-210, jun. 2006.

VITTE, A. C.; MELLO, J. P. D. Considerações sobre a erodibilidade dos solos e a erosividade das chuvas e suas consequências na morfogênese das vertentes: um balanço bibliográfico. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 2, n. 2, p. 107-133, 2007.

VUGT, L.C. **Mapping and modelling of landslide and flood hazards on St. Eustatius with openLISEM.** 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Superfície da Terra e Água) – UTRECHT University, 2018. Disponível em: <[https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/373444/Thesis_LottedeVugt\[final\].pdf?sequence=1](https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/373444/Thesis_LottedeVugt[final].pdf?sequence=1)> Acesso em: 07 jan. 2021.

WALLING, D.E. The Sediment Delivery Problem. **Journal of Hydrology**, n. 65, p. 209-237, 1983.

WEMPLE, B.C. et al. Channel network extension by logging roads in two basins, Western Cascades, Oregon. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 32, n. 6, p. 1195-1207, 1996.

WEMPLE, B.C.; SWANSON, F.J.; JONES, J.A. Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, p. 191-204, 2001.

WILKINSON, S.N.; KINSEY-HENDERSON, A.E.; HAWDON, A.A.; HAIRSINE, P.B.; BARTLEY, R.; BAKER, B. Grazing impacts on gully dynamics indicate approaches for gully erosion control in northeast Australia. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 8, p. 1711-1725, jun. 2018.

WISCHMEIER, W.H. A rainfall-erosion index for a Universal Soil Loss Equation. **Soil Sci. Am. Proc.**, v. 23, n. 3, p. 246—249, 1959.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Rainfall Energy and Its Relationship to Soil Loss. **Transactions of American Geophysical Union**, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning**. Washington: USDA Agriculture Handbook n.537, 1978.

WOODING, R.A. Steady Infiltrarion from Shallow Circular Pond. **Water Resour. Res.**, v. 4, p. 1259-1273, 1968.

WOODWARD, A.L. Infants' ability to distinguish between purposeful and non-purposeful behaviors. **Infant Behavior and Development**, v. 22, p. 145-160, 1999.

ZHANG, B. et al. Impacts of headcut height on flow energy, sediment yield and surface landform during bank gully erosion processes in the Yuanmou Dry-hot Valley region, southwest China. **Earth Surface Processes And Landforms**, v. 43, p. 2271-2282, 2018.

ZIEGLER, A. D.; NEGISHI, J.N.; SIDLE, R.C.; NOGUCHI, S.; NIK, A.R. Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. **Catena**, v. 67, p. 89-104, 2006.

ZIEGLER, A. D.; SUTHERLAND, R.A.; GIAMBELLUCA, T.W. Acceleration of Horton overland flow and erosion by footpaths in an upland agricultural watershed in Northern Thailand. **Geomorphology**, v. 41, p. 249-262, 2001.

ZIMBONE, S.M.; VICKERS, A.; MORGAN, R.P.C.; VELLA, P. Field investigations of different techniques for measuring surface soil shear strength. **Soil Technology**, v. 9, p. 101-111, maio 1996.

ZOCCAL, J.C. **Soluções cadernos de estudos em conservação do solo e água**. Presidente Prudente: CODASP, 2007.