

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA CAROLINA SANCHES DE ANGELO

PRECIPITAÇÃO EXTREMA E MODELAGEM HIDROGEOMORFOLÓGICA DE
FLUXO DE DETRITOS NA BACIA DO JACAREÍ – SERRA DO MAR PARANAENSE

Curitiba

2022

ANA CAROLINA SANCHES DE ANGELO

PRECIPITAÇÃO EXTREMA E MODELAGEM HIDROGEOMORFOLÓGICA DE
FLUXO DE DETRITOS NA BACIA DO JACAREÍ – SERRA DO MAR PARANAENSE

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, na linha de pesquisa de Paisagem e Análise Ambiental, como requisito à obtenção do título de mestre.

Orientação: Prof. Dr. Irani dos Santos.

Curitiba

2022

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

Angelo, Ana Carolina Sanches de

Precipitação extrema e modelagem hidrogeomorfológica de fluxo de detritos na Bacia do Jacareí – Serra do Mar Paranaense / Ana Carolina Sanches de Angelo. – Curitiba, 2022. 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. Detritos. 2. Sedimentos (Geologia). 3. Hidrogeologia. 4. Geomorfologia. 5. Serra do Mar (PR). I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Santos, Irani dos. IV. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

ANA CAROLINA SANCHES DE ANGELO


PRECIPITAÇÃO EXTREMA E MODELAGEM HIDROGEOMORFOLÓGICA DE FLUXO DE DETRITOS NA BACIA DO JACAREÍ – SERRA DO MAR PARANAENSE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geografia do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia, na linha de pesquisa “Paisagem e Análise Ambiental”, em defesa realizada por meio de videoconferência na data de 14/07/2022.




Prof. Dr. Irani dos Santos – Orientador

Departamento de Geografia – Universidade Federal do Paraná

Documento assinado digitalmente
 FELIPE COSTA ABREU LOPES
Data: 15/12/2022 22:27:11-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Felipe Costa Abreu Lopes - Avaliador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Documento assinado digitalmente
 GEAN PAULO MICHEL
Data: 09/01/2023 12:27:01-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Gean Paulo Michel - Avaliador

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Dr. Pedro Augusto Breda Fontão - Avaliador

Departamento de Geografia – Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 9 de Outubro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no contexto do projeto “Influência da floresta na dinâmica hidrossedimentológica de bacias montanhosas no Sul do Brasil”, promovido pela CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior e pela ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento. Agradeço a estas instituições pela viabilização da pesquisa neste contexto de desvalorização do pensamento científico (primavera de 2021). Porque ninguém anda só, agradeço ainda com especial apreço:

Ao orientador, Prof. Dr. Irani dos Santos. Por dispor de seu tempo, por me ensinar a distinguir o que é importante e por sempre dedicar-se em compartilhar o que sabe de forma objetiva. Imensurável o valor desta convivência. Ao colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPR e à secretária Alexandra.

Ao Capitão Anderson Gomes e ao Capitão Marcos Vidal da Defesa Civil do Paraná e ao Instituto Nacional de Meteorologia, ao Sr. Edson Nagashima do AGUASPARANÁ e à Sra. Gislene Lessa do ITCG (IAT hoje) pela solicitude. Também à Dra. Kana Nakatani do *Laboratory of Erosion Control* da Universidade de Kioto e ao Prof. Dr. Maurício Paixão do IPH – UFRGS por viabilizarem o uso do modelo Hyper Kanako. Ao colega Dr. Felipe Costa Abreu Lopes pela partilha dos seus valiosos levantamentos feitos na bacia do rio Gigante e pelas sugestões. Da mesma forma à Dra. Karen Bueno, por junto do Felipe terem aberto os caminhos do estudo dos MGMS no Laboratório de Hidrogeomorfologia da UFPR (LHG). Ao LAGEO pelo compartilhamento de informações, nas pessoas do prof. Dr. Claudinei Taborda e Dr. Ricardo Pinheiro. Aos profs. Drs. Pedro Augusto Breda Fontão (UFPR) e Gean Paulo Michel (IPH-UFRGS) pelas preciosas contribuições; ao geólogo Edir Edemir Arioli e ao prof. Dr. Masato Kobiyama pelo apoio inicial no tema antes do mestrado, quando eu ainda trabalhava para o projeto do SIGRisco-PR no SIMEPAR.

Aos meus colegas de trabalho. Primeiramente na Secretaria de Meio Ambiente de Rio Branco do Sul, em especial ao Denilson Mendes, à Juliana Cavassin, à Elisabete Alves, ao Pedro Freitas e à Raíssa Xavier pelo apoio neste processo no ano de 2021. Da mesma forma ao Fernando Marangon pelo apoio e confiança no ano de 2022. Eles tornaram viável o desafio do término deste trabalho em meio ao meu exercício profissional.

Aos meus colegas da Especialização em Data Science e em especial ao meu orientador naquele curso, Prof. Dr. Wagner Bonat. Eles me ajudaram a evoluir e qualificar esta pesquisa no que diz respeito ao manejo e à análise de dados.

Aos colegas do LHG, em especial à Dra. Bruna Taveira e Msc. Daniel Lange, pelo companheirismo. E a Cynthia Roberti, Dr. Fernando Marangon, Dr. Gilson Schultz, Msc. Lucas Jersurki, Msc. Isabella Iensen, Msc. Juliana Carvalho, Luan e Nicolas pelas contribuições diretas e indiretas para a realização deste trabalho. São colegas com cuja simples convivência aprendi muito.

Aos meus pais, que são a principal motivação da minha busca acadêmica/profissional. E a toda minha família, à minha solidária vizinhança do Pilarzinho e a cada um de meus amigos por compreenderem esse período de ausência e pelo apoio emocional, nutricional, ético e logístico que sempre me deram. Destaco ainda a contribuição direta do Eng. Eduardo Ballesteros Sánchez, de Gabriela Branco de Souza e de Guido Gelbcke para este trabalho.

E à população que indiretamente financia pesquisas como esta, espero que o agradecimento chegue na forma de informações úteis à gestão territorial e de risco nas bacias de áreas montanhosas.

RESUMO

A Serra do Mar é um dos ambientes montanhosos brasileiros com maior suscetibilidade intrínseca a movimentos gravitacionais de massa (MGMs). O clima local corrobora este cenário pela alta incidência de chuvas intensas. Este estudo busca avaliar aspectos hidrogemomorfológicos da ocorrência de fluxos de detritos na Serra do Mar, a partir de análises de dados e da modelagem na bacia hidrográfica do rio Jacareí, entre os municípios de Morretes-PR e Paranaguá-PR. A paisagem da bacia sofreu grandes transformações após os movimentos gravitacionais de massa (MGMs) decorrentes das chuvas de março de 2011. Muitas pesquisas foram desenvolvidas no local, resultando sobretudo no mapeamento da suscetibilidade das encostas. O presente estudo contribui com este debate como projeto voltado ao entendimento da dinâmica hidrogeomorfológica em bacias montanhosas e florestadas, edital CAPES/ANA e universidades no sul do Brasil. Na primeira frente deste estudo foram avaliadas as condições hidrometeorológicas do evento – como a excepcionalidade e a gênese atmosférica do “Águas de Março”. Isto foi realizado por meio da análise estatística de dados hidrometeorológicos horários, de reanálise climática; e da avaliação de dados de sensoriamento remoto da Terra. Foram identificados aportes de umidade de oeste e do oceano, influenciados pela ocorrência de um cavado com a formação de um corredor de umidade sobre a região, com contribuição de uma ZCAS e de anticiclones periféricos que sustentaram a persistência da precipitação. As análises indicam que a singularidade do evento Águas de Março está associada à duração (143 horas) e ao acumulado (406,4 mm) mais do que às intensidades máximas horárias (42,6 mm/h). A partir de curvas IDF o tempo de retorno calculado para o evento é de 80 anos. Concluiu-se que a longa duração está associada à simultaneidade de atuação entre estes sistemas atmosféricos. Na segunda frente, o estudo buscou-se avaliar as características geomorfológicas e a contribuição da bacia do rio Gigante para os fluxos de detritos e avaliar a aplicabilidade do modelo Hyper Kanako para estudos na região. Realizou-se a calibração e validação do modelo com a geração de escavação-transporte-deposição correspondente ao “Águas de Março”. Como produtos intermediários sugeriu-se uma metodologia para geração de MDT de boa resolução (2,5 m) com condições de espessura anteriores ao evento e uma para a estimativa volumétrica de detritos lenhosos gerados. O volume de detritos lenhosos estimado para a bacia do rio Gigante foi de 79223 m³. A extensão de área abrangida pelos depósitos de material oriundo desta sub-bacia foi de 1,93 kms e de 3,68 kms para o alcance dos fluxos. O volume modelado de solo e rocha movimentados foi de 504378,39 m³ para toda a bacia do rio Jacareí, que representa 73% do volume estimado por meio de cicatrizes (análise espacial). O modelo Hyper Kanako demonstrou-se passível de aplicação para a região podendo ser empregado para planejamento territorial e de gestão de risco de desastres, mediante novos experimentos de calibração.

Palavras-chave: Fluxos de detritos, Hyper Kanako, precipitação extrema, Serra do Mar

ABSTRACT

Serra do Mar is one of the Brazilian mountainous reliefs most prone to gravitational mass movements. Local climate also contributes to this susceptibility scenario due to frequent and intense rainfall occurrence. This study aims to outline hydrogeomorphological factors relevant to debris flow occurrence in Serra do Mar, through data analysis and modeling at the Jacareí river basin located between Paranaguá-PR and Morretes-PR municipalities, in southern Brazil. Local landscape was severely impacted by gravitational mass movements resultant of intense rainfall occurred in march 11th 2011. Subsequently many studies were made there, resulting majorly in susceptibility mapping of the Jacareí river basin. This study is part of a regional initiative centered on the hydrogeomorphological dynamics at mountainous forested reliefs, promoted by CAPES, ANA and southern Brazilian universities. First, we analyzed the hydrometeorological conditions associated with the debris flow occurrence, such as the event exceptionality and the atmospheric conditions of the Aguas de Março rainfall event. The analyses show that the singularity of the event is associated with the accumulated rainfall volume (406,4 mm) and its duration (143 hours) than to maximum rainfall intensity (42,6 mm/h). IDF curves were established for the Jacareí river basin, gathered with the Aguas de Março event return period, of 80 years. The event's origin is related to the encountering of humidity coming from WNW and from the ocean (E), both influenced by a trough that formed a humidity corridor over southern Brazil. The precipitation persistence was also caused by peripheral anticyclones and humidity displaced from the ZCAS region. We concluded that rainfall persistence was caused by the simultaneous occurrence of different atmospheric systems. Secondly, some shape aspects of the landslides were analyzed such as: volume, distribution, flow and deposits depth and vegetation cover variation. The Hyper Kanako model was calibrated and validates for the Gigante River basin considering the "Águas de Março" rainfall event. Some intermediate products were generated in the debris flow analyses, such as: a methodology for remodeling a DTM with 2,5 m resolution that simulates terrain conditions and soil depth previous to the Aguas de Março event and another for estimating the volume of wooden debris generated. The wooden debris estimated for the Gigante River basin is 79223 m³. The debris-flow reached approximately 3,68 kms while deposits reached 1,93 kms. The modeled volume of material mobilized in the event was 504378,39 m³, what represents 73% of the volume evaluated through the landslide scars and spatial analysis. The results show that the calibration and use of Hyper Kanako model for basin and territorial management of disaster-prone areas is feasible and can be applied on land management after further calibration experiments.

Key-words: Debris-flow, Hyper Kanako, extreme precipitation, Serra do Mar relief.

RESUMEN

La Serra do Mar se destaca como uno de los ambientes montañosos brasileños con mayor susceptibilidad a movimientos gravitacionales de masa (MGMs). El clima local también contribuye para este escenario por la alta incidencia de lluvias intensas. Este estudio busca comprender aspectos hidrogemomorfológicos de la ocurrencia de flujos de detritos en la Serra do Mar, a partir de análisis de datos y modelado de la cuenca hidrográfica del Río Jacareí, ubicado entre Morretes-PR y Paranaguá-PR, en el sur de Brasil. El paisaje de la cuenca sufrió importantes transformaciones luego de los MGMs producto de las lluvias del 11 de marzo de 2011. Se llevaron a cabo muchas investigaciones en el sitio, que resultaron principalmente en el mapeo de la susceptibilidad a los MGMs. Este estudio contribuye con este debate como un proyecto destinado a comprender la dinámica hidrogeomorfológica en cuencas montañosas y frondosas, con fomento de CAPES/ANA y de universidades del sur de Brasil. En primer lugar, se evaluaron las condiciones hidrometeorológicas asociadas a los flujos de detritos - como la excepcionalidad y la génesis atmosférica del evento "Aguas de Março". Esto se hizo con análisis estadístico de datos hidrometeorológicos horarios, análisis climático; y la evaluación de datos de sensores remotos de la Tierra. Se identificaron aportes de humedad del occidente y del océano, influenciados por la ocurrencia de una vaguada con la formación de un corredor de humedad sobre la región, con el aporte de una ZCAS y anticiclones periféricos que sostuvieron la persistencia de la precipitación. Los análisis indican que la singularidad del evento Aguas de Março está asociada a la duración (143 horas) y al acumulado (406,4 mm) más que a las intensidades horarias máximas (42,6 mm/h). A partir de las curvas IDF, el período de retorno calculado para el evento es de 80 años. Se concluyó que la larga duración está asociada a la simultaneidad de acción entre estos sistemas atmosféricos. En el segundo punto, fueron evaluadas las características geomorfológicas y la contribución de la cuenca del río Gigante a los flujos de detritos. También fue evaluada la aplicación del modelo Hyper Kanako, calibrado y validado conforme el evento de lluvia ocurrido. Como principales productos intermedios se sugirió una metodología de generación de MDT de buena resolución (2,5 m), simulando condiciones de espesor de suelo previas al evento y la estimación volumétrica de los detritos leñosos. El volumen estimado de desechos leñosos para la cuenca del Río Gigante fue de 79223 m³. La extensión del área cubierta por los depósitos de material de la cuenca del río Gigante fue de 1,93 kms y 3,68 kms para el alcance de los flujos. El volumen modelado de suelo y rocas movidos para toda cuenca del Jacareí fue 504.378,39 m³, lo que representa el 73% del volumen estimado por las cicatrices. Se demostró que el modelo Hyper Kanako es pasible de aplicación a la región y puede ser utilizado para la planificación territorial y la gestión del riesgo de desastres, por medio de nuevos experimentos de calibración.

Palabras-clave: Flujo de Detritos, Hyper Kanako, precipitación extrema, Serra do Mar.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DANOS A INFRAESTRUTURAS LOGO APÓS OS EVENTOS.	21
FIGURA 2 - EVIDÊNCIAS DA “RECENTE” MOBILIZAÇÃO DE BLOCOS (2014)...	21
FIGURA 3 – EQUIPES MOBILIZADAS PARA A REMOÇÃO DE DETRITOS LENHOSOS. CICATRIZES NA SERRA DA PRATA AO FUNDO.	21
FIGURA 4 – DETRITOS LENHOSOS AO LONGO DO PERFIL FLUVIAL (AEN, SET. 2011).	22
FIGURA 5 - TEMAS CENTRAIS ABORDADOS PELAS PESQUISAS REALIZADAS NA BACIA DO JACAREÍ ATÉ DEZ. 2018.	22
FIGURA 6 - ÁREAS DE ESTUDO DO PROJETO “INFLUÊNCIA DA FLORESTA NA DINÂMICA HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DE BACIAS MONTANHOSAS NO SUL DO BRASIL.	23
FIGURA 7 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ.....	26
FIGURA 8 - MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ, CONFORME MINEROPAR/IAT(2016).....	27
FIGURA 9 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO E HIPSOMETRIA DA BACIA DO RIO JACAREÍ.....	28
FIGURA 10 - MAPA SOBRE IMAGEM RAPID EYE OBTIDA 2 MESES APÓS O EVENTO DAS ÁGUAS DE MARÇO, COM SINALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS DIVISORES DE ÁGUAS DA BACIA DO HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ.	29
FIGURA 11 - IMAGEM AÉREA OBLÍQUA DE ORIENTAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ — ORIENTAÇÃO DA IMAGEM ESTÁ DECRITA EM AMARELO PELA ORIENTAÇÃO DAS FEIÇÕES.....	29
FIGURA 12 - IMAGEM AÉREA OBLÍQUA COM DESTAQUE PARA AS DIFERENÇAS DE ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DAS VERTENTES LESTE E OESTE DA BACIA DO RIO JACAREÍ. ANO DE 2012.	30
FIGURA 13 - MAPA DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ. .	31
FIGURA 14 - MAPA DE SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO JACAREÍ.	32
FIGURA 15 – FOTO DA CASA TESTEMUNHO.	32
FIGURA 16 - A) EVIDÊNCIAS DOS PROCESSOS DE TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO NA BACIA. B) EXEMPLO DE ATIVIDADES AGRÁRIAS LOCAIS (PALMITO/BANANA).	33
FIGURA 17 - EVOLUÇÃO NO USO/COBERTURA DO SOLO NA BACIA DO RIO JACAREÍ.....	33
FIGURA 18 - CLIMOGRAMA DO MUNICÍPIO DE MORRETES-PR A873 – INMET.	35
FIGURA 19 - ÁREAS DEFINIDAS PARA SIMULAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIO GIGANTE.....	36
FIGURA 20 – A) CONJ. IBITIRAQUIRE (IBITIRATI, UNIÃO E PARANÁ) VISTO DESDE O ITAPIROCA. B) CONJUNTO MARUMBI. C)SERRA DA PRATA.....	37
FIGURA 21 - CENÁRIO TECTÔNICO DO SUDESTE BRASILEIRO COM DESTAQUE EM VERMELHO PARA A REGIÃO DA ÁREA DE ESTUDO.	38

FIGURA 22 - FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS OBJETO DA HIDROGEOMORFOLOGIA.	43
FIGURA 23 - CARTAS SINÓTICAS DE SUPERFÍCIE DAS 21 HORAS DOS DIAS 8 A 13 DE MARÇO DE 2021 – HORÁRIO LOCAL (9 A 14/03/2011 – 00Z – GMT)....	53
FIGURA 24 - IMAGEM DE SATÉLITE GOES-12 COLORIDA DA NOITE DO DIA 11 (12/03/2011 – 00Z GMT), DESTACANDO A ABRANGÊNCIA DA NEBULOSIDADE MAIS DENSA E AS DUAS ZONAS ANTICICLÔNICAS A OESTE E A LESTE DO CAVADO; EM DESTAQUE, DUAS IMAGENS NO CANAL INFRAVERMELHO REALÇADO EXIBINDO A ENTRADA DO SISTEMA CONVECTIVO NO LITORAL DO PARANÁ.	54
FIGURA 25 – DADOS DE ANOMALIA DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA E VENTOS NO PERÍODO DO EVENTO.	54
FIGURA 26 – DADOS DE UMIDADE ESPECÍFICA PARA O DIA 11 DE MARÇO DE 2021 ÀS 21 HORAS.....	55
FIGURA 27 - IMAGEM MODIS DO DIA 11/03/2011 – 14 HORAS NO HORÁRIO LOCAL (17Z GMT). INDÍCIOS DA INFLUÊNCIA DA OROGRAFIA SOBRE OS SISTEMAS ATUANTES.	56
FIGURA 28 - PRECIPITAÇÃO MENSAL MÉDIA NA SÉRIE HISTÓRICA DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL COLÔNIA SANTA CRUZ (06/1974 – 10/2018) EM PRETO, COM DESTAQUE EM CINZA CLARO PARA O VALOR ACUMULADO DO MÊS DE MARÇO DE 2011.	57
FIGURA 29 - SÉRIES DE DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MORRETES-A873, CORRESPONDENTES AO PRINCIPAL EVENTO EM ANÁLISE – ENTRE OS DIAS 8 (TERÇA) E 14/03/2011 (SEGUNDA). O DIA 11 DE MARÇO DE 2011 CORRESPONDE À SEXTA-FEIRA.	58
FIGURA 30 - BOXPLOTS DAS CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS AVALIADAS POR ESTAÇÕES DO ANO, NO CONJUNTO DE DADOS DE EVENTOS GERADO A PARTIR DOS DADOS DA ESTAÇÃO MORRETES-A873. O EVENTO ÁGUAS DE MARÇO ESTÁ DESTACADO EM VERMELHO.	58
FIGURA 31 - PERMANÊNCIA DOS VALORES DE ACUMULADO PLUVIOMÉTRICO, MÁXIMA INTENSIDADE HORÁRIA E DURAÇÃO DE EVENTOS AGRUPADOS AO LONGO DA SÉRIE. O DESTAQUE EM VERMELHO CORRESPONDE AO EVENTO SEVERO DO DIA 11/03/2011.	61
FIGURA 32 – CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA GERADAS POR APLICAÇÃO DA GEV COM DEPENDÊNCIA DA DURAÇÃO DOS EVENTOS PARA OS PERÍODOS DE RETORNO DE 2, 10 E 100 ANOS.	62
FIGURA 33 - CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA GERADAS POR APLICAÇÃO DA GEV COM DEPENDÊNCIA DA DURAÇÃO DOS EVENTOS.	62
FIGURA 34 – EXPERIMENTOS DE ESTUDOS DOS FLUXOS DE DETRITOS REALIZADOS PELO USGS.....	66
FIGURA 35 – DISPONIBILIDADE DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO E RESOLUÇÃO.....	69

FIGURA 36 - IMAGEM WORLDVIEW PÓS-EVENTO (MAIO DE 2011) E PRESENTE (2021).....	74
FIGURA 37 - COMPARAÇÃO VISUAL ENTRE RESULTADOS DE MDT PREENCHIDO E MDT REMODELADO.....	76
FIGURA 38 – SEÇÃO TRANSVERSAL (EM VERMELHO NO MAPA) DE EXMPLO – DIFERENÇAS ENTRE O MDT REMODELADO (PRETO NO GRÁFICO) E O MDT PREENCHIDO (VERMELHO NO GRÁFICO).	77
FIGURA 39 – EXEMPLO DE SEÇÃO TRANVERSAL EM ÁREA DE MGM, COM PERFIS DE COMPARAÇÃO DOS TRÊS MODELOS.	78
FIGURA 40 – MDT REMODELADO E FEIÇÕES PERTINENTES A ETAPAS POSTERIORES DE SIMULAÇÃO.	79
FIGURA 41 - ESTIMATIVA DE ALTURA DA VEGETAÇÃO NA PARTE INTERNA DAS CICATRIZES – RECORTE DA BACIA NA REGIÃO ONDE VEGETAÇÃO FOI MOBILIZADA.	82
FIGURA 42 – DEFORMAÇÃO DOS FLUIDOS CONFORME TENSÃO DE CISALHAMENTO APLICADA.	86
FIGURA 43 - ÁREAS DEFINIDAS PARA SIMULAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIO GIGANTE.....	89
FIGURA 44 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO MODELO.	89
FIGURA 45 - FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO DO MODELO.....	91
FIGURA 46 - MAPEAMENTO DE FEIÇÕES RELEVANTES.....	94
FIGURA 47 MEDIÇÃO DA ALTURA DE LAMA NA CASA TESTEMUNHO.....	99
FIGURA 48 - RESULTADOS DE ALTURA DO FLUXO (H) PARA AS SIMULAÇÕES 5 E 24.....	100
FIGURA 49 - RESULTADOS DE ALTURA DO FLUXO (H) PARA AS SIMULAÇÕES 37 E 45.....	101
FIGURA 50 - RESULTADOS DE ALTURA DO FLUXO (H) PARA AS SIMULAÇÕES 59 E 63.....	101
FIGURA 51 - RESULTADOS DE ESPESSURA DE DEPÓSITO (ZS) PARA AS SIMULAÇÕES 5 E 24.	102
FIGURA 52 - RESULTADOS DE ESPESSURA DE DEPÓSITO (ZS) PARA AS SIMULAÇÕES 37 E 45.	102
FIGURA 53 - RESULTADOS DE ESPESSURA DE DEPÓSITO (ZS) PARA AS SIMULAÇÕES 59 E 63.	103
FIGURA 54 – CALIBRAÇÃO – COINCIDÊNCIA ENTRE DEPÓSITO MAPEADO E DEPÓSITO MODELADO – DADOS COMPARADOS PELO ÍNDICE KAPPA.	104
FIGURA 55 - HIDROGRAMA DO EVENTO PARA ÁREA 1	106
FIGURA 56 – HIDROGRAMA DO EVENTO PARA ÁREA 2.....	106
FIGURA 57 - HIDROGRAMA DO EVENTO PARA ÁREA 3	107
FIGURA 58 - RESULTADOS DE FORÇA DO FLUXO PARA A SIMULAÇÃO FINAL DA ÁREA 3, PARA A VARIÁVEL H EM 3 PASSOS DE TEMPO.....	111
FIGURA 59 - RESULTADOS DE FORÇA DO FLUXO PARA A SIMULAÇÃO FINAL DA ÁREA 3, PARA A VARIÁVEL N EM 3 PASSOS DE TEMPO.....	112

FIGURA 60 - RESULTADOS PARA A SIMULAÇÃO FINAL DA ÁREA 3, PARA A VARIÁVEL W EM 3 PASSOS DE TEMPO.....	113
FIGURA 61 - RESULTADOS DE ESPESSURA DO DEPÓSITO PARA ÁREA 3, PARA A VARIÁVEL ZS EM 3 PASSOS DE TEMPO.	114
FIGURA 62 – MAPA DE FEIÇÕES RELEVANTES E DECLIVIDADE	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EVOLUÇÃO USO E COBERTURA SOLO PELO LEVANTAMENTO DO MAPBIOMAS (SOUZA, 2020).....	34
TABELA 2 - EXEMPLOS DE CATEGORIAS DE CLASSIFICAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO POR INTENSIDADE.....	44
TABELA 3 - MÁXIMAS DIÁRIAS REGISTRADAS NOS PLUVIÔMETROS DO INMET NO BRASIL.....	51
TABELA 4 - PRINCIPAIS EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS NA SÉRIE DA ESTAÇÃO MORRETES – A873.....	59
TABELA 5 - FREQUÊNCIAS DE CARACTERÍSTICAS DE EVENTOS E COMPARAÇÃO COM O EVENTO ÁGUAS DE MARÇO.....	61
TABELA 6 – VALOR DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO GEV AJUSTADOS AO CONJUNTO DE DADOS DA ESTAÇÃO MORRETES A873 POR MEIO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA.....	61
TABELA 7 - ESTIMATIVA DE ALTURA E VOLUME DA VEGETAÇÃO NA PARTE INTERNA DAS CICATRIZES PARA TODAS AS SUB-BACIAS.	80
TABELA 8 - ESTIMATIVA DE ALTURA E VOLUME DA VEGETAÇÃO NA PARTE INTERNA DAS CICATRIZES NAS SUBÁREAS DE SIMULAÇÃO.	81
TABELA 9 – CARACTERÍSTICAS DE FLUXOS DE DETRITOS E FLUXOS CORRELATOS.	87
TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DA BACIA, DA PRECIPITAÇÃO E TEMPOS CALCULADOS.....	96
TABELA 11 – PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DO LEITO DO RIO (1D).	97
TABELA 12 - PARÂMETROS GERAIS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO COM HYPER KANAKO VÁLIDOS PARA PORÇÃO DE ESCAVAÇÃO (1D) E DE DEPOSIÇÃO (2D).	97
TABELA 13 - CONSTANTES DE ENTRADA NO MODELO.....	98
TABELA 14 – PRINCIPAIS ALTERAÇÕES DE PARÂMETRO PARA CADA SIMULAÇÃO - CALIBRAÇÃO.....	99
TABELA 15 – DADOS DO HIDROGRAMA PARA ÁREA 1.	105
TABELA 16 – DADOS DO HIDROGRAMA PARA ÁREA 2.	105
TABELA 17 - DADOS DO HIDROGRAMA PARA ÁREA 3.	105
TABELA 18 - EXTENSÃO/ABRANGÊNCIA DE CICATRIZES E DEPÓSITOS DOS FLUXOS.....	108
TABELA 19 – VOLUMES ESTIMADOS DE APORTE DA SUBÁREA 3 (BACIA DO RIO GIGANTE).....	108
TABELA 20 – ALCANCES E VELOCIDADE ESTIMADOS DE APORTE DA SUBÁREA 3 SIMULADA.....	109

LISTA DE SIGLAS

AGUASPARANÁ – Instituto das Águas do Paraná (Antigo instituto de gestão dos recursos hídricos no Paraná, hoje incorporado ao IAT)

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior

CNPQ – Conselho Nacional de Pesquisa

IAT – Instituto Água e Terra (autarquia estadual que gerencia estudos e licenciamento ambiental no estado do Paraná, hoje parte da Secretaria Estadual do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo)

MDT – Modelo Digital de Terreno

MGM – Movimento Gravitacional de Massa

MINEROPAR – Minerais do Paraná (Antiga empresa pública de estudos geológicos incorporada à autarquia estadual IAT)

LISTA DE SÍMBOLOS

- a – espessura de materiais de leito recém depositados
- a_L – espessura do leito instável
- C – coeficiente da fórmula de resistência
- C_D – coeficiente de arraste aparente de partículas a montante
- c – concentração média de sólidos por volume em toda profundidade do fluxo
- c_∞ – concentração de equilíbrio de sólidos grossos no fluxo de detritos
- c_{S_∞} – concentração de equilíbrio de sólidos grossos em fluxos de detritos imaturos
- c^* - concentração de sólidos no leito
- d – diâmetro médio das partículas em toda profundidade do fluxo
- d_i - diâmetro médio das partículas na região infinitesimal i
- d_k – diâmetro da partícula k
- d_m – diâmetro médio da partícula no grid
- g – aceleração da gravidade
- h – profundidade do fluxo
- i – velocidade da erosão (>0) ou da deposição (<0)
- K – constante
- n – Coeficiente de resistência de Manning
- p – constante numérica inferior à unidade
- q_T – Descarga unitária de fluxo de detritos (*unit width discharge of debris flow*)
- $q_x - U_h$ - componente x do fluxo
- $q_y - V_h$ - componente y do fluxo
- r – aporte de água lateral por unidade de tamanho do canal
- S_b – Grau de saturação do leito
- t – tempo
- U – velocidade média do fluxo de detritos
- U_e - velocidade de equilíbrio do fluxo de detritos fluindo a jusante sem deposição ou erosão
- u – velocidade na altura z
- x – coordenada do espaço na direção do fluxo
- Z_b – espessura da erosão ou da deposição no leito
- β' – coeficiente teórico de momentum para direção x
- β'' - coeficiente teórico de momentum para direção y

δ_d – constante numérica

δ_e – constante numérica

θ – declividade média do canal

θ_{bxo} – componente x do ângulo de inclinação em relação ao leito original

θ_{byo} – componente y do ângulo de inclinação em relação ao leito original

θ_e – declividade de equilíbrio do leito que transporta sólidos com concentração c

θ_o – inclinação do leito original

$\lambda = [(c^*/c)^{1/3} - 1]^{-1}$ - concentração linear

ρ – densidade da água

ρ_T – densidade específica de fluxo de detritos $[\bar{\sigma}c + (1-c)\rho]$

$\bar{\sigma}$ – densidade dos sólidos

T_{bx} – componente x da resistência ao fluxo

T_{by} – componente y da resistência ao fluxo

T_f – tensão de cisalhamento no leito produzido pelo fluido intersticial

T_f^* – expressão adimensional de T_f

T_{fe}^* – tensão de cisalhamento de equilíbrio não dimensional

Φ – ângulo de fricção interna das partículas de sedimento do leito.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	19
1.1 “ÁGUAS DE MARÇO” E OS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	20
1.2 JUSTIFICATIVA.....	22
1.3 OBJETIVOS.....	24
1.4 ESTRUTURA.....	24
2. ÁREA DE ESTUDO	26
2.1 RECORTE TERRITORIAL PARA MODELAGEM DE FLUXO DE DETRITOS – A SUB-BACIA DO RIO GIGANTE.....	35
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL	37
3.1 A SERRA DO MAR PARANAENSE E OS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	37
3.2 OS FLUXOS DE DETRITOS.....	40
3.3 O PARADIGMA DA HIDROGEOMORFOLOGIA	42
4. ÁGUAS DE MARÇO: ORIGEM E EXCEPCIONALIDADE DE EVENTO EXTREMO DE PRECIPITAÇÃO OCORRIDO NA SERRA DO MAR PARANAENSE	44
4.1 INTRODUÇÃO	44
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.2.1 Circulação Atmosférica	49
4.2.2 Evento Extremo de Precipitação.....	49
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.3.1 Gênese do Evento Extremo de Precipitação	51
4.3.2 Magnitude e Duração da Precipitação	56
4.4 CONCLUSÕES	63
5. LIMITAÇÃO E MANEJO DE DADOS DE RELEVO E VEGETAÇÃO PARA VIABILIZAÇÃO DO CÁLCULO DE VOLUMES MOVIMENTADOS EM FLUXOS DE DETRITOS NA BACIA DO RIO JACAREÍ - PR	66
5.1 INTRODUÇÃO	66
5.2 MATERIAIS E MÉTODOS	70
5.2.1 Preparação e remodelagem do MDT para a execução de experimentos de modelagem de fluxo de detritos com Hyper Kanako	70
5.2.2 Cálculo de volume movimentado durante o evento a partir das cicatrizes	73
5.2.3 Estimativas de altura e volume de vegetação/detritos lenhosos.....	74

5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.3.1	Modelo digital de terreno em boa resolução simulado para condições pretéritas ao levantamento original	76
5.3.2	Cálculo do volume escorregado durante o evento (volume observado - cicatrizes).....	80
5.3.3	Estimativa de altura da vegetação e volume de detritos lenhosos	80
5.4	CONCLUSÕES	83
6.	MODELAGEM DE FLUXO DE DETRITOS E A CONTRIBUIÇÃO DA SUB-BACIA DO RIO GIGANTE DURANTE O EVENTO “ÁGUAS DE MARÇO”	84
6.1	INTRODUÇÃO	84
6.2	MATERIAIS E MÉTODOS	88
6.2.1	Mapeamento de feições relevantes: matacões e detritos lenhosos.....	93
6.2.2	Estabelecimento dos hidrogramas do evento de fluxo de detritos	94
6.2.3	Parâmetros, calibração e validação do modelo Hyper Kanako para o evento Águas de Março	96
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
6.3.1	Volume escorregado e construção dos hidrogramas.....	105
6.3.2	Modelagem hidrogeomorfológica do evento Águas de Março de 2011 – a aplicabilidade do modelo Hyper Kanako.	107
6.4	CONCLUSÕES	117
7.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	118
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

1. INTRODUÇÃO GERAL

Dentre os movimentos gravitacionais de massa (MGMs), os fluxos de detritos se destacam pelos impactos gerados nas paisagens. Eles têm potencial de promover rapidamente grandes e definitivas alterações na geomorfologia e na dinâmica hidrossedimentológica de uma bacia. Existem diversos tipos de fluxos de detritos, com ou sem presença de água. Contudo, as condições climáticas e hidrogeomorfológicas brasileiras implicam numa recorrência maior daqueles que são deflagrados pela chuva. A partir dela ocorre a mobilização inicial do material escorregado, massa que acaba direcionada aos canais fluviais pela gravidade e pela ação da água. A intensidade destes contatos pode promover até mesmo a reescavação dos leitos fluviais e a liquefação dos solos, contribuindo para a constituição de um material lamoso, com grande poder de dispersão e arraste.

No Brasil, a paisagem mais propensa à ocorrência dos fluxos de detritos é a Serra do Mar, com destaque para os episódios ocorridos nas regiões sul e sudeste, conforme abordaram Kobiyama e Michel (2014; 2015), em panorama que permaneceu inalterado. Conforme pontuaram estes autores, houve um aumento na ocorrência de fluxos de detritos no país desde a década de 1990, em especial nas regiões serranas dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná e Santa Catarina. Também se destacam algumas ocorrências de fluxos de detritos em regiões declivosas do Rio Grande do Sul (PAIXÃO E KOBİYAMA, 2017; OLIVEIRA ET AL (2018).

As perspectivas de agravamento da precipitação na região da Serra do Mar (NASCIMENTO et al. 2020; DE MELLO et al., 2017; REGOTO et al., 2021) e da pressão de expansão dos centros urbanos sobre áreas de perigo aumenta a importância do estudo destes temas no país. Além de impor desafios à ocupação territorial, os fluxos de detritos são extremamente relevantes na evolução e nas transformações pelas quais passa a dinâmica hidrogeomorfológica de uma região. Villaça-Gomes *et al.* (2022) confirmaram que os fluxos de detritos, apesar de episódicos, estão entre os agentes principais de erosão e evolução da Serra do Mar e influenciaram significativamente na retração deste relevo.

Dessa forma, é importante conhecer, descrever e quantificar agentes de processos rápidos como os fluxos de detritos nas regiões serranas. Estas

informações são relevantes para a gestão territorial e de risco de desastres na Serra do Mar, e para os estudos associados à evolução dessa importante paisagem brasileira. Em vista dos fatores de ocorrência citados, a avaliação de três conjuntos de aspectos revela-se fundamental na compreensão dos fluxos de detritos, especialmente no contexto brasileiro: a chuva e o regime hidrológico, o relevo e o solo, e a vegetação. Análises sob este escopo contribuem potencialmente para o entendimento dos processos hidrogeomorfológicos a que as bacias estão submetidas, o que pode ser feito por meio da análise de seus atributos físicos e de modelagem. Dessa forma, compreender a gênese, a frequência e a magnitude dos eventos de precipitação, bem como a influência de parâmetros geomorfológicos nestes processos é relevante para o entendimento da dinâmica hidrogeomorfológica da Serra do Mar e da resposta da região às chuvas extremas.

O presente estudo busca desenvolver esta análise no contexto da bacia hidrográfica do rio Jacareí, porção paranaense da Serra do Mar no estado do Paraná, onde foram registrados fluxos de detritos de grande impacto no ano de 2011.

1.1 “ÁGUAS DE MARÇO” E OS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Na primeira quinzena de março de 2011 fortes chuvas induziram a ocorrência de escorregamentos e fluxos de detritos na bacia hidrográfica do rio Jacareí. A localidade atingida pelos movimentos gravitacionais de massa (MGMs) chama-se bairro Floresta e não era densamente ocupada à época. Ainda assim, muitos agricultores e famílias do local sofreram grandes perdas materiais diante da dispersão de lama e de detritos pela planície, como se observa na Figura 1. Na ocasião, já no dia 11/03/2011, foram identificadas pela Defesa Civil do Paraná 15.178 pessoas afetadas e um óbito no município de Morretes e 1.973 afetados em Paranaguá (DC-PR, 2019). O evento que ficou conhecido como “Águas de Março” causou diversos danos na infraestrutura local de abastecimento de água e luz e isolou parcialmente o litoral do Paraná.

O grande poder de arraste e a expressiva mobilização de sedimentos finos e blocos indica que o evento foi caracterizado por MGMs que têm a chuva como gatilho em áreas de instabilidade de encostas, como é característico da Serra do Mar. A chuva foi identificada prontamente como fator deflagrador devido ao acumulado pluviométrico extraordinário registrado entre os dias 5 e 13 de março de 2011.

FIGURA 1 - DANOS A INFRAESTRUTURAS LOGO APÓS OS EVENTOS.



As imagens abaixo trazem uma ideia do poder de mobilização e transporte de blocos e matacões (Figura 2) e de detritos lenhosos (Figura 3 e Figura 4).

FIGURA 2 - EVIDÊNCIAS DA “RECENTE” MOBILIZAÇÃO DE BLOCOS (2014).



FONTE: A AUTORA (2014).

FIGURA 3 – EQUIPES MOBILIZADAS PARA A REMOÇÃO DE DETRITOS LENHOSOS. CICATRIZES NA SERRA DA PRATA AO FUNDO.



FONTE: AEN (2011).

FIGURA 4 – DETRITOS LENHOSOS AO LONGO DO PERFIL FLUVIAL (AEN, SET. 2011).

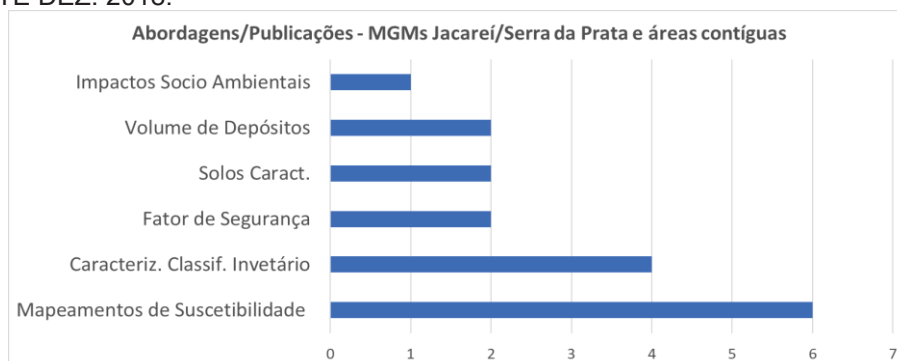


FONTE: AEN (2011).

1.2 JUSTIFICATIVA

Os fenômenos observados na bacia do rio Jacareí em 2011 foram discutidos em diversos trabalhos acadêmicos desde então, sobretudo a respeito da suscetibilidade intrínseca do local aos MGMs. A FIGURA 5 ilustra um levantamento bibliográfico que retrata este episódio ocorrido na Serra da Prata e bacias contíguas. Foi observado que a maioria das pesquisas contemplou a realização de mapeamentos de suscetibilidade (6), seguida de caracterização, classificação e inventário de movimentos de massa (4), fator de segurança nas encostas (2), caracterização dos solos (2), cálculo do volume de depósitos (2) e impactos socioambientais (1)¹.

FIGURA 5 - TEMAS CENTRAIS ABORDADOS PELAS PESQUISAS REALIZADAS NA BACIA DO JACAREÍ ATÉ DEZ. 2018.

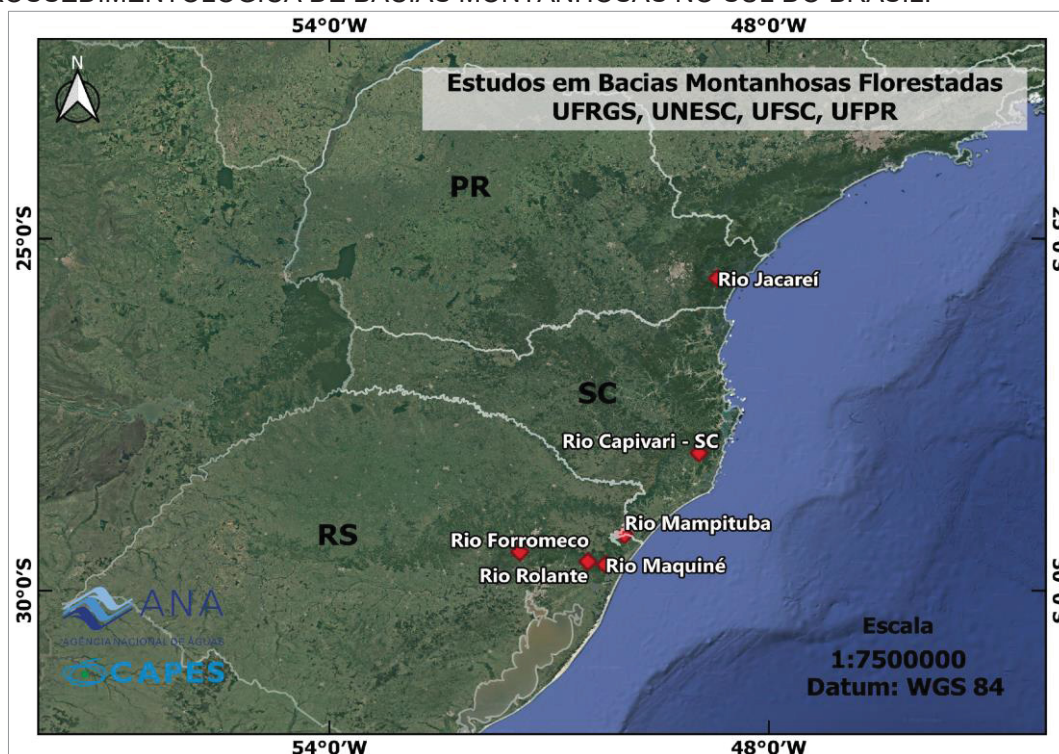


¹FONTE: A AUTORA (2018) A PARTIR DE BUENO, 2015; FOLADOR ET AL., 2018; LOPES ET AL., 2015; MELO ET AL., 2015; MARTINS ET AL., 2012; PINTO ET AL., 2012, 2015 E 2014; SATO ET AL., 2017; SILVA ET AL., 2012; SILVEIRA ET AL., 2013, 2012 E 2014; STURION, 2013 E TANAKA ET AL., 2015.

O evento de 2011 motivou, portanto, a criação de uma base de dados importante e necessária para os estudos na região. Entretanto, há ainda espaço e demanda para novas pesquisas que unam os dados já existentes ao monitoramento e a outros métodos de modelagem e subsidiem reflexões teóricas sobre os processos envolvidos. De forma adicional, a avaliação da aplicabilidade de modelos de propagação de fluxo apresenta novas ferramentas passíveis de uso para avaliação de situações de risco no local.

Esta demanda associada a ambientes como o da Serra do Mar paranaense é recorrente por todo país e motiva a criação de projetos por diversas agências de fomento. O presente trabalho se insere também neste contexto ilustrado pela Figura 6, sendo parte de um projeto da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento) e da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), intitulado “Influência da floresta na dinâmica hidrossedimentológica de bacias montanhosas no sul do Brasil”. Os estudos vêm sendo realizados por algumas universidades (UFSC, UNESC, UFRGS, UFPR) a partir do paradigma da hidrogeomorfologia e de produtos de monitoramento e modelagem.

FIGURA 6 - ÁREAS DE ESTUDO DO PROJETO “INFLUÊNCIA DA FLORESTA NA DINÂMICA HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DE BACIAS MONTANHOSAS NO SUL DO BRASIL.



FONTE: A AUTORA (2019).

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os fatores hidrogeomorfológicos para a formação de fluxos de detritos em bacia montanhosa e florestada no sul do Brasil. Os objetivos específicos são:

- Determinar as condições hidrometeorológicas que desencadearam eventos de fluxos de detritos na bacia do rio Jacareí – excepcionalidade, magnitude e gênese atmosférica da precipitação.
- Avaliar as características de distribuição do material mobilizado pelos movimentos gravitacionais, testando a aplicabilidade do modelo Hyper Kanako para a simulação de fluxo de detritos na sub-bacia do rio Gigante.

1.4 ESTRUTURA

Este estudo apresenta estrutura híbrida. Ele possui introdução, revisão, considerações e revisão bibliográfica gerais, válidas para todo o documento. Entretanto, o conteúdo de pesquisa, análises e resultados apresenta-se na forma de três artigos, correspondentes aos capítulos 4, 5 e 6, em que uma revisão bibliográfica mais específica sobre cada tema consta junto da introdução. O Quadro 1 ilustra a estrutura geral deste documento.

QUADRO 1 - ESTRUTURA DO DOCUMENTO.

		EVENTO PLUVIOMÉTRICO	MANEJO DE DADOS RELEVO E VEGETAÇÃO	MODELAGEM DE FLUXO DE DETRITOS						
1 INTRODUÇÃO GERAL	2 ÁREA DE ESTUDO	4 Águas de Março: origem e excepcionalidade de evento extremo de precipitação ocorrido na Serra do Mar paranaense	5 Métodos de preparação de dados pertinentes à modelagem de fluxos de detritos	6 Condições geomorfológicas, de cobertura vegetal e os fluxos de detritos na bacia do rio Jacareí – contribuição da sub-bacia do rio Gigante	7 CONSIDERAÇÕES FINAIS					
	3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL						MÉTODOS	• Estudo estatístico séries históricas de chuva; • Gênese atmosférica do evento • Descrição da excepcionalidade do evento pluviométrico;	• Remodelagem de MDT pretérito • Estimativas de volume de vegetação	• Caracterização geomorfológica - descrição e análise das formas de relevo; • Cenários de fluxo e calibração; • Métricas de avaliação.
	DADOS/RECURSOS						Séries de dados meteorológicos; Cartas sinóticas; Imagens oriundas de sensoriamento remoto.	Modelos digitais de terreno; Levantamentos radarimétricos de altura da vegetação; Imagens oriundas de sensoriamento remoto;	Dados remodelados e estimativas de relevo e vegetação Modelo HyperKanako.	

FONTE: A AUTORA (2022).

Este primeiro capítulo trata da introdução ao tema e ao episódio estudado; o segundo trata da descrição da área de estudo em todos os aspectos físicos e de ocupação que são pertinentes à discussão; o terceiro trata de uma revisão bibliográfica geral sobre o tema; o quarto — estruturado na forma de artigo — trata da gênese e da excepcionalidade do evento pluviométrico que causou os fluxos de detritos em 2011 na bacia; o quinto — também estruturado na forma de artigo — trata do manejo de dados que foi necessário como etapa prévia da modelagem para adequação das bases; o sexto discute a modelagem do fenômeno e os fatores hidrogeomorfológicos associados; e o sétimo constitui as considerações finais deste trabalho.

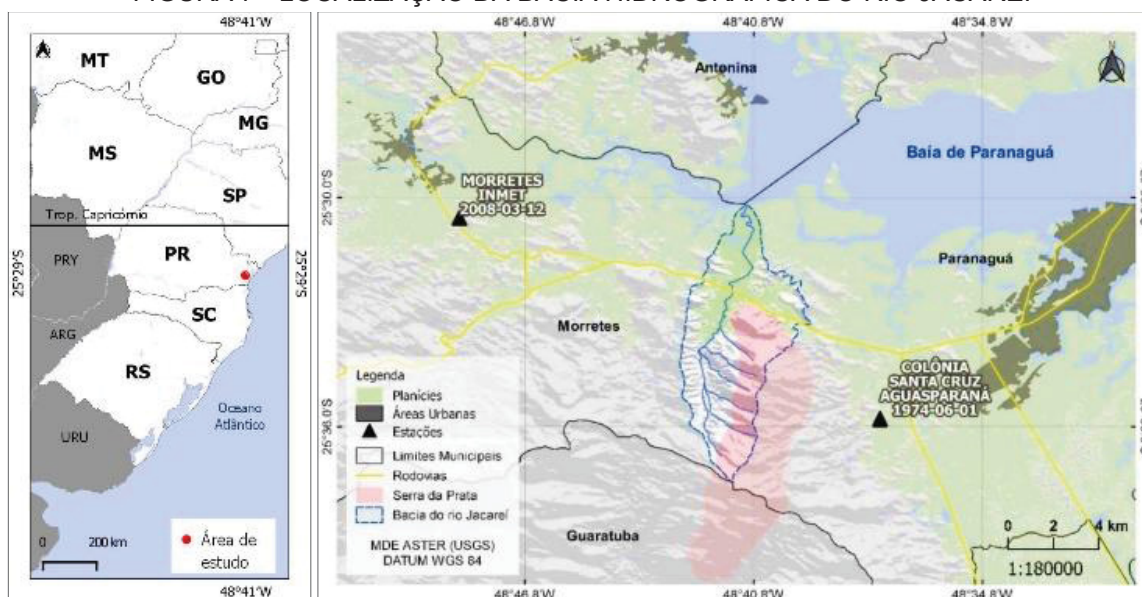
Ressalta-se que a maioria dos resultados foram obtidos considerando-se a totalidade da bacia hidrográfica do rio Jacareí, exceto no caso das estimativas volumétricas de detritos não-lenhosos e da modelagem de fluxo de detritos constantes no penúltimo capítulo deste trabalho. No capítulo citado, utiliza-se o recorte espacial da sub-bacia do rio Gigante.

2. ÁREA DE ESTUDO

Dentre os desastres causados por fenômenos naturais no estado do Paraná, destacam-se pela maior frequência aqueles associados a processos hidrológicos, meteorológicos e geológicos. Observa-se grande concentração de registros de MGMS na região da Serra do Mar do estado, onde concorrem condições climáticas e geomorfológicas favoráveis a este tipo de fenômeno (DC-PR, 2019).

A porção paranaense da Serra do Mar é uma região montanhosa onde se situa a área de estudo deste trabalho - a bacia hidrográfica do rio Jacareí, no limite entre os municípios de Morretes e Paranaguá. O mapa da Figura 7 ilustra a localização da bacia e seu contexto administrativo e fisiográfico.

FIGURA 7 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ



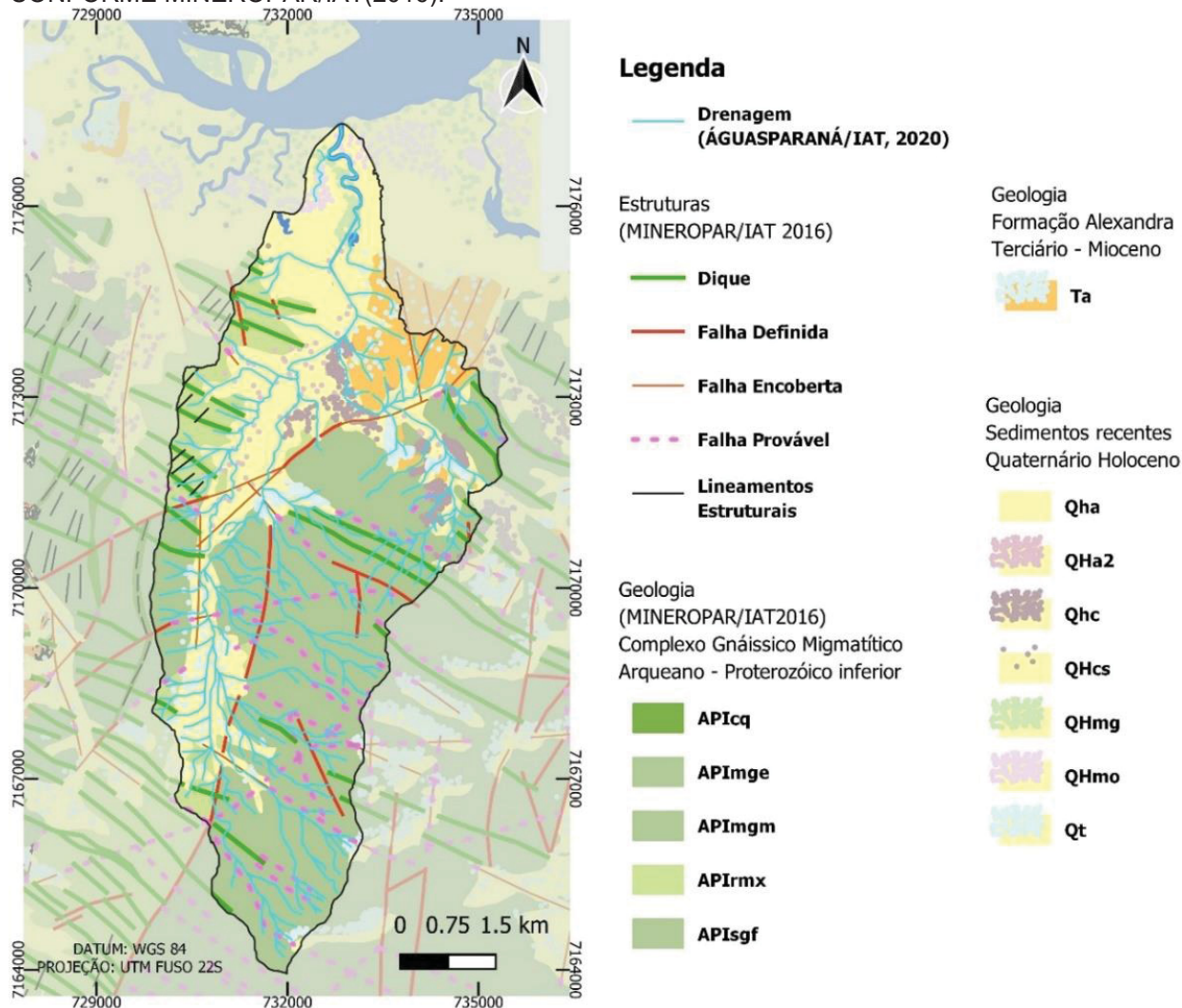
FONTE: A AUTORA (2019).

A bacia é cruzada em seu terço final pela BR-277, que conecta o litoral à capital do estado. A bacia abriga também o bairro Floresta, ocupado majoritariamente por produtores rurais. A área da bacia é de 49,72 km². As nascentes dos afluentes do rio Jacareí distribuem-se pelas montanhas e pela Serra da Prata — componente da Serra do Mar — que constitui o principal divisor de águas, na porção leste da bacia. O rio estende-se de sul a norte, com exutório na região estuarina da baía de Paranaguá, a aproximadamente 14 kms de distância do divisor de águas mais austral, na divisa com o município de Guaratuba, ao sul mapa principal da Figura 7.

Em relação à geologia, conforme MINEROPAR/IAT (2016) e mapa disposto na Figura 8, a bacia hidrográfica do rio Jacareí é abrangida majoritariamente pelo

Complexo Gnáissico-Migmatítico de rochas granitóides nas porções mais altas; e por sedimentos recentes ao longo do rio Jacareí e da planície associada a ele. Há ainda pequena área associada à Formação Alexandra na porção NE da área. Os principais aspectos estruturais mapeados na região consistem em uma falha definida paralela ao curso do rio Jacareí em sentido S-N; um enxame de diques em sentido SE-NW; e uma série de falhas prováveis neste mesmo sentido. Distinguindo-se das estruturas predominantes constam falhas em sentido SW-NE, e outras variações isoladas.

FIGURA 8 - MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ, CONFORME MINEROPAR/IAT(2016).



FONTE: A AUTORA (2021).

Contígua às porções mais declivosas da bacia a leste, encontra-se uma planície aluvial que acompanha o rio principal, e ocupa uma área de 10,09 km². Uma característica geomorfológica de destaque é a amplitude topográfica expressa na curta transição entre a planície - situada a 5 metros s.n.m. (sobre o nível do mar) em

média - e as montanhas da serra – cujo cume, na Torre da Prata, está a 1470 metros s.n.m. Estes aspectos podem ser observados na Figura 9, na Figura 10 e na Figura 11 a seguir.

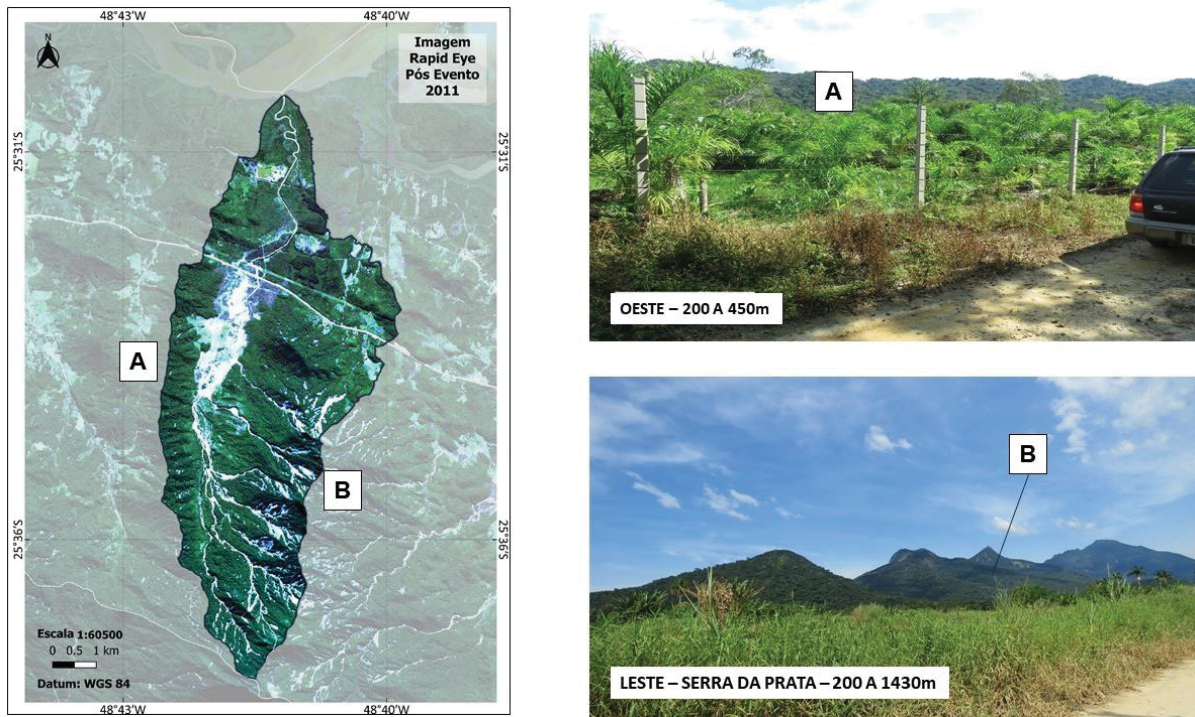


FONTE: A AUTORA (2020).

Grande parte da bacia é permeada por colúvios e tálus (MINEROPAR, 2014). O cenário de instabilidade das encostas é favorecido em especial pela grande amplitude altimétrica entre os divisores de águas e o talvegue do rio principal; pela declividade das encostas e pela distância relativamente curta até o exutório na baía de Paranaguá.

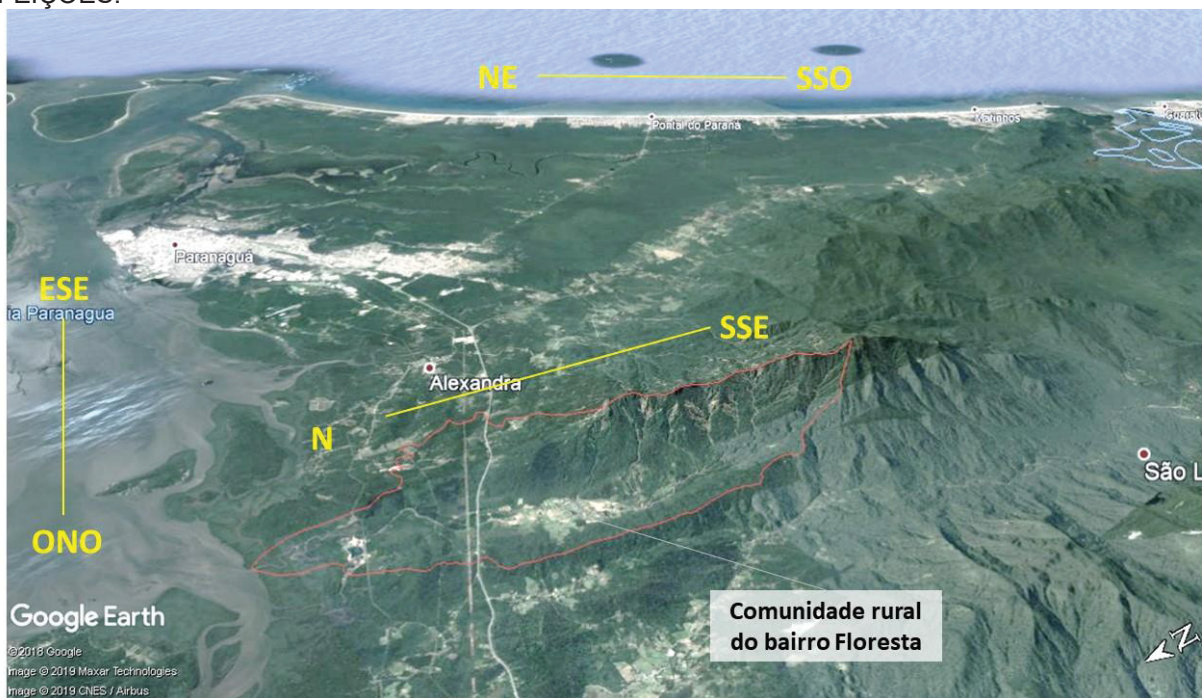
Observa-se também a partir da Figura 12 que as sub-bacias da porção leste têm maior área de contribuição e acentuadas declividades com a ocorrência de vales profundamente encaixados no sentido SE-NW. Esta região, correspondente à Serra da Prata, é identificada no mapa geológico da Figura 8 como o Complexo Gnáissico-Migmatítico, seccionado por diques de diabásio que condicionam as formas das vertentes a leste.

FIGURA 10 - MAPA SOBRE IMAGEM RAPID EYE OBTIDA 2 MESES APÓS O EVENTO DAS ÁGUAS DE MARÇO, COM SINALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS DIVISORES DE ÁGUAS DA BACIA DO HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ.



FONTE: A AUTORA (2019).

FIGURA 11 - IMAGEM AÉREA OBLÍQUA DE ORIENTAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ — ORIENTAÇÃO DA IMAGEM ESTÁ DECRITA EM AMARELO PELA ORIENTAÇÃO DAS FEIÇÕES.



FONTE: GOOGLE EARTH (2019) / A AUTORA (2019).

FIGURA 12 - IMAGEM AÉREA OBLÍQUA COM DESTAQUE PARA AS DIFERENÇAS DE ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DAS VERTENTES LESTE E OESTE DA BACIA DO RIO JACAREÍ. ANO DE 2012.



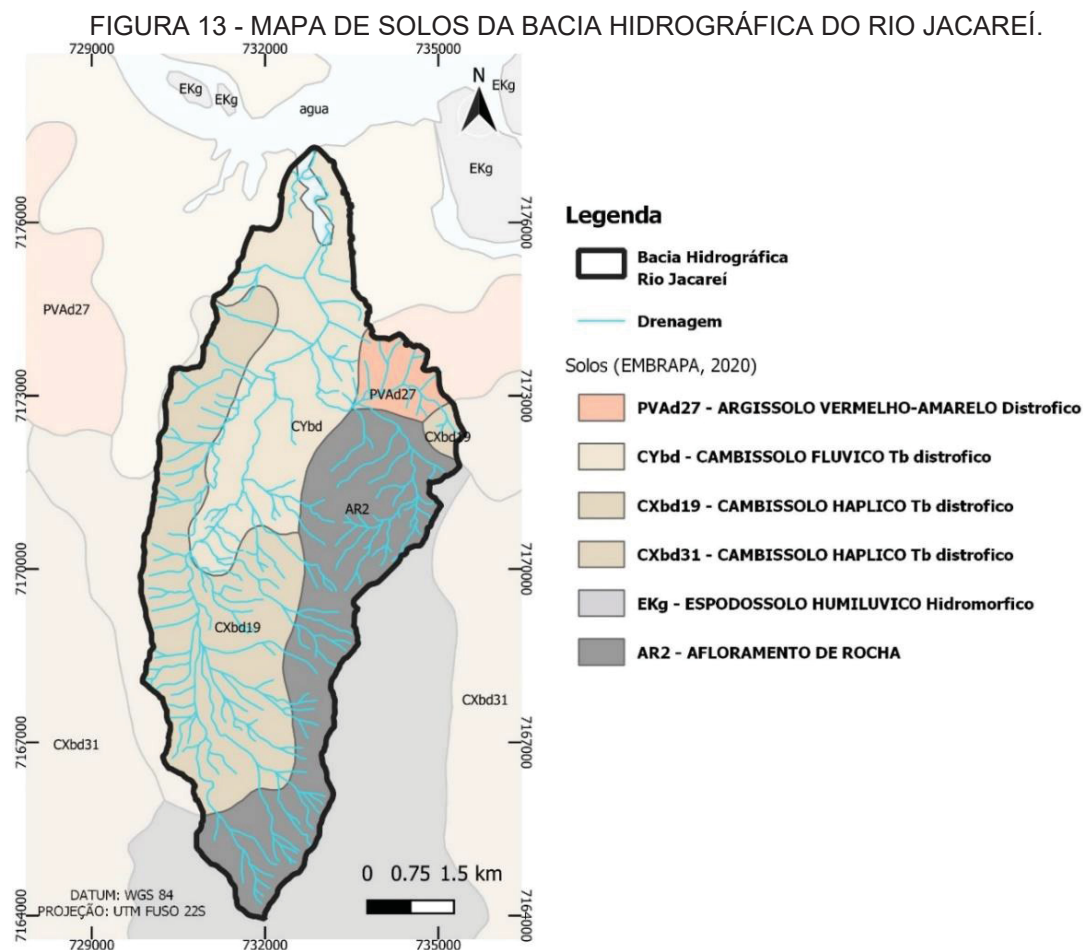
FONTE: GOOGLE EARTH (2019) / A AUTORA (2019).

A declividade é menos acentuada nos pontos mais próximos à planície do rio Jacareí, proporcionando melhores condições de deposição, sobretudo no deságue no rio principal. Dessa maneira, desde a porção média do rio Jacareí ocorrem leques deposicionais e depósitos aluviais que demarcam planícies progressivamente mais extensas conforme se avança em direção ao exutório no estuário parnanguara, onde as declividades são reduzidas, já no domínio da planície costeira - representada no mapa da Figura 8 como “Sedimentos Recentes” (MINEROPAR, 2006).

Os solos da bacia são combinações entre neossolos litólicos associados a afloramentos rochosos na área da Serra da Prata (AR); combinações entre cambissolos háplicos distróficos típicos (CXbd19) e argissolos vermelho amarelos distróficos latossólicos nas porções média e oeste da bacia; associação entre cambissolos flúvicos (CYybd) e gleissolos háplicos indiscriminados no terço inferior, com ocorrência de argissolos vermelho-amarelos (PVAd27) na porção nordeste. De modo geral são caracterizados como pouco profundos, apesar de serem encontradas

espessuras de até 8 metros em alguns locais, sempre acompanhados de blocos rochosos (LOPES, 2019).

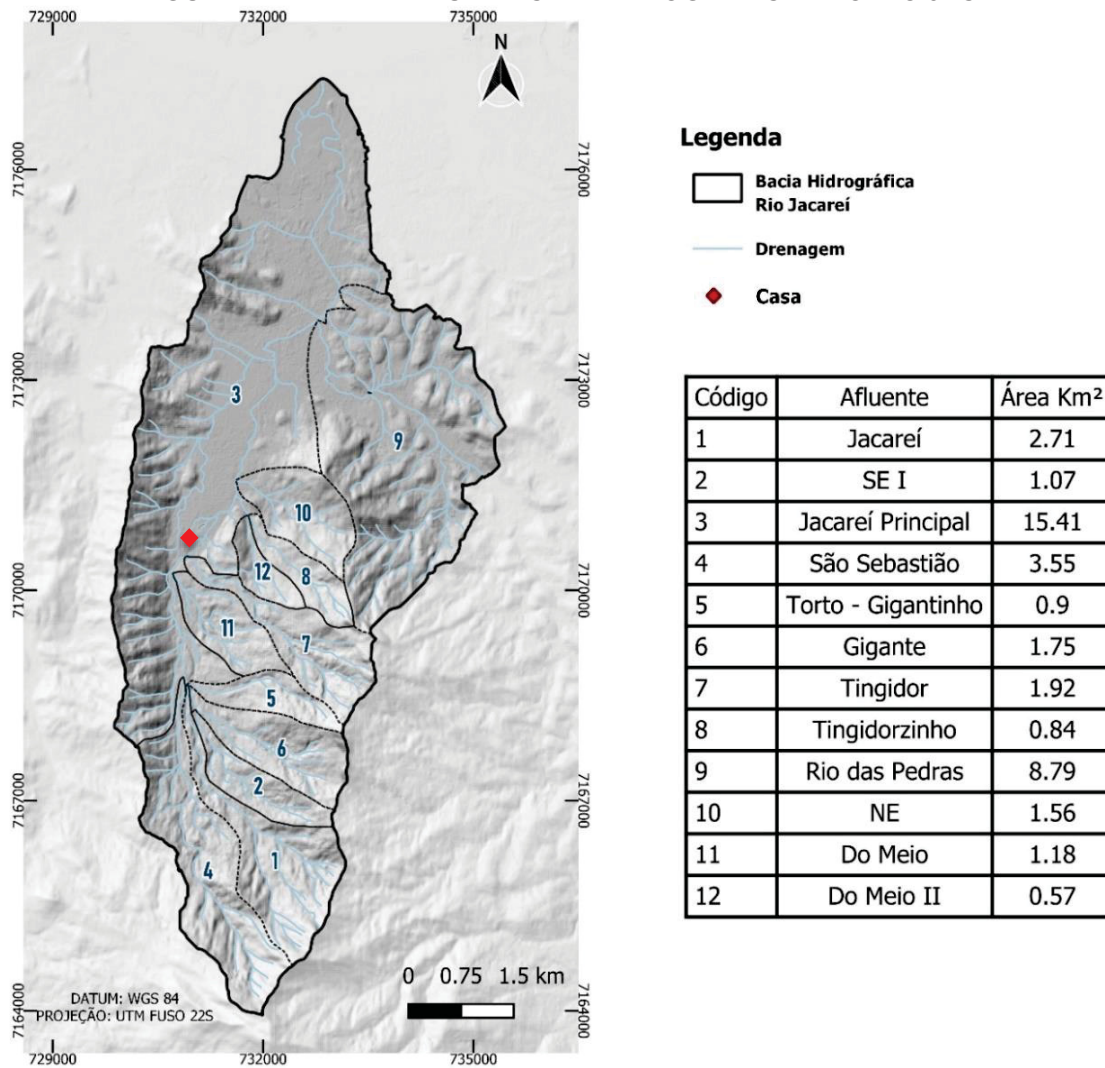
A Figura 13 a seguir apresenta a distribuição dos solos na área de estudo.



FONTE: A AUTORA (2021).

No que concerne às sub-bacias, a bacia hidrográfica do rio Jacareí pode ser dividida em 12 unidades, conforme mapa a seguir. Neste trabalho não serão detalhados aspectos da bacia do Rio das Pedras diante da compartimentação do relevo, que a separa dos efeitos diretos dos movimentos gravitacionais de massas nas porções mais a montante. Serão enfatizadas as sub-bacias da porção sul de montante, com destaque para a sub-bacia do rio Gigante (número 6 na Figura 14), sobre a qual há maior disponibilidade de dados e levantamentos. Destaca-se também no mapa da figura a seguir uma casa — sinalizada em vermelho — daqui em diante denominada “casa testemunho”, onde estão registradas nas paredes a altura de lama a que chegaram os fluxos neste ponto, já na planície do rio Jacareí. Na sequência do mapa, na Figura 15 apresenta-se uma foto da casa.

FIGURA 14 - MAPA DE SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO JACAREÍ.



FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 15 – FOTO DA CASA TESTEMUNHO.



FONTE: A AUTORA (2021).

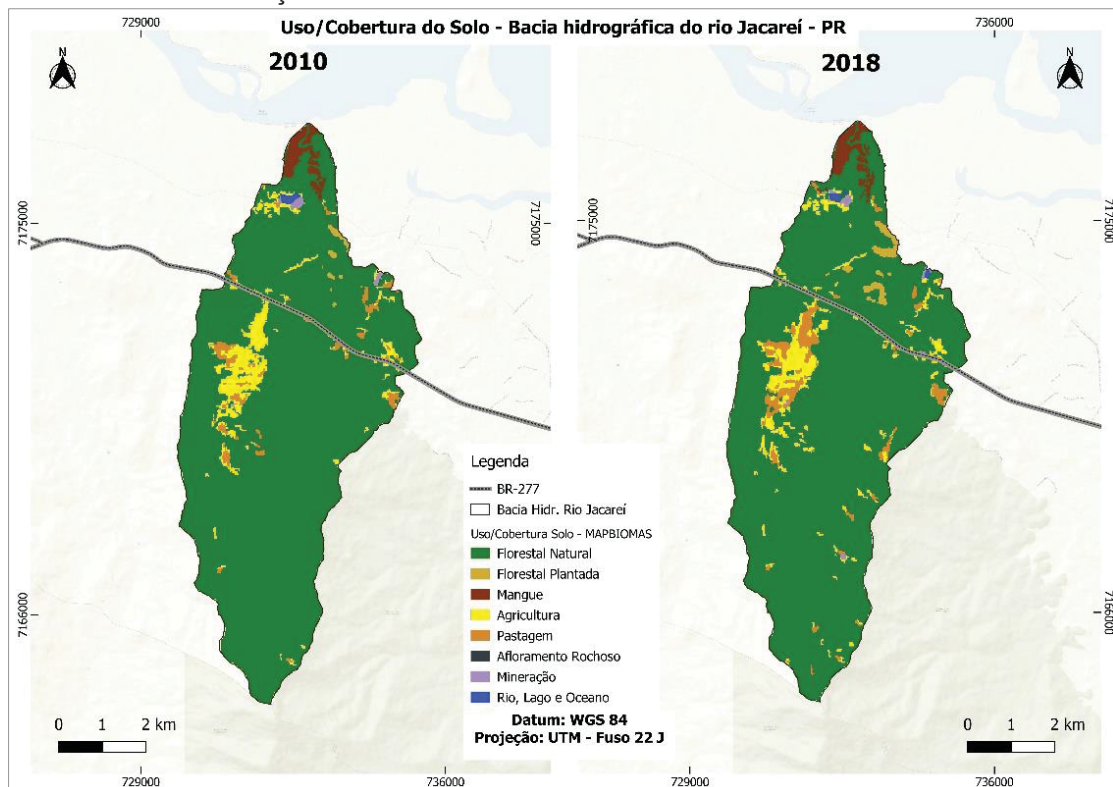
As características climáticas da região favorecem o intemperismo químico e físico e propiciaram historicamente a pedogênese e o desenvolvimento da vegetação no local, marcado pela presença da Floresta Ombrófila Densa, conforme observável na Figura 16. Esta cobertura florestal abrange grande parte da bacia, sendo mais densa e natural nas porções declivosas e permeada por espécies exóticas e cultivos nas áreas mais planas. Na região do baixo curso do rio encontram-se também espécies de mangue.

FIGURA 16 - A) EVIDÊNCIAS DOS PROCESSOS DE TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO NA BACIA. B) EXEMPLO DE ATIVIDADES AGRÁRIAS LOCAIS (PALMITO/BANANA).



FONTE: A AUTORA (2018).

FIGURA 17 - EVOLUÇÃO NO USO/COBERTURA DO SOLO NA BACIA DO RIO JACAREÍ.



FONTE: MAPBIOMAS - COLEÇÃO 4 (SOUZA ET AL., 2020) / A AUTORA (2019).

A bacia de forma geral não é densamente ocupada, sendo sua população fixa composta por produtores rurais alocados esparsamente ao longo dela, contendo também casas de campo de ocupação inconstante (Figura 16). São comuns na bacia as plantações de maracujá, mandioca e hortaliças na planície e palmitais e bananais nas regiões de mais difícil acesso - mais distantes da BR-277.

A Figura 17 apresenta o uso do solo para os anos de 2010 e 2018, conforme levantamento do projeto MapBiomas (SOUZA et al., 2020). Por meio dela é possível identificar a predominância da cobertura florestal na bacia, a ausência de infraestrutura urbana expressiva para além da estrutura de pistas da rodovia e a predominância de atividades agropecuárias nas áreas antropizadas (em laranja e amarelo). Estes aspectos evidenciam-se também a partir dos dados da Tabela 1, em que podem ser analisados em termos quantitativos. Esta tabela demonstra também o avanço expressivo de atividades identificadas como pecuária e como silvicultura, indicando uma tendência ao desmatamento e à diversificação das atividades econômicas no local.

TABELA 1 - EVOLUÇÃO USO E COBERTURA SOLO PELO LEVANTAMENTO DO MAPBIOMAS (SOUZA, 2020)

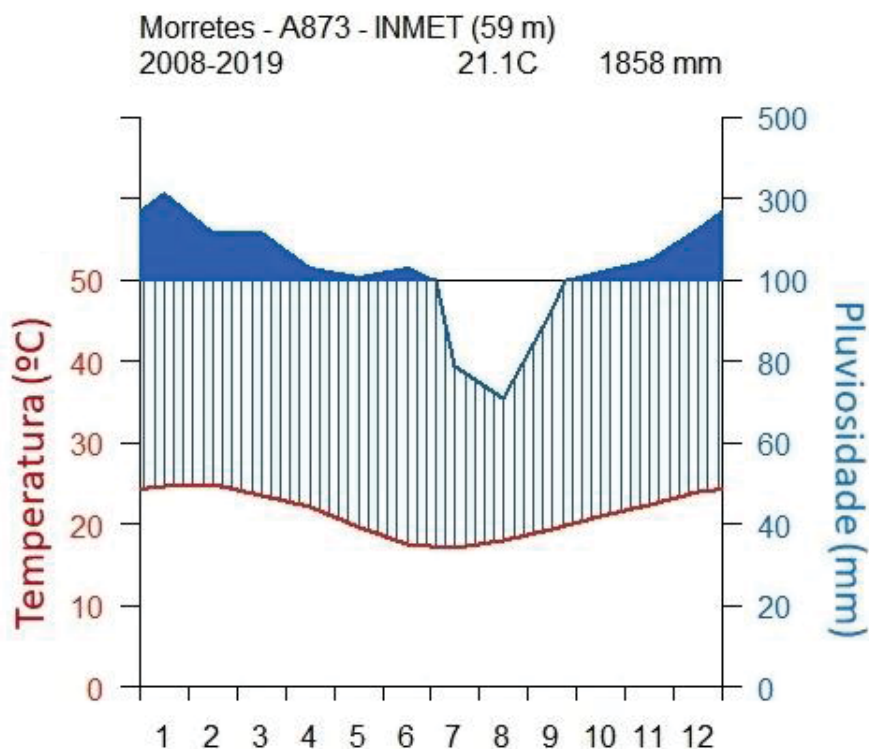
Bacia hidrográfica do rio Jacareí - Uso e Cobertura do solo				
Tipo de Uso Avaliado	2010		2018	
	Áreas (km ²)	(% do total)	Áreas (km ²) 2018	(% do total)
Florestal Natural	36,198	90.04%	35.312	87.83%
Agricultura	2,207	5.49%	2.204	5.48%
Pastagem	0,857	2.13%	1.437	3.58%
Florestal Manguê	0,589	1.46%	0.621	1.54%
Florestal Plantada	0,140	0.35%	0.417	1.04%
Mineração	0,140	0.35%	0.140	0.35%
Massas de Água	0,074	0.18%	0.073	0.18%
Área da bacia encoberta MAPBIOMAS	40,204			

FONTE: MAPBIOMAS - COLEÇÃO 4 (SOUZA ET AL., 2020) / A AUTORA (2019).

Junto aos fatores de suscetibilidade aos MGMs - como os aspectos geomorfológicos, pedológicos e de uso do solo - soma-se o clima quente e úmido da região, associado aos tipos Cfa e Cfb conforme a classificação de Köppen (ITCG, 2006). Respectivamente, os tipos correspondem ao clima subtropical úmido com inverno fresco a frio, e ao clima subtropical úmido com inverno frio - predominante acima dos 700 m s.n.m, na Serra do Mar (VANHONI E MENDONÇA, 2008). Nas porções próximas à planície, portanto, as médias de temperatura estão sempre acima dos 22°C. Com relação à pluviosidade, esta é a região mais chuvosa do estado do

Paraná onde o acumulado pluviométrico varia entre 2000 e 2400 mm anuais, conforme recentes normais climatológicas e observações históricas (IAPAR, 2019; MAACK, 1968). O período mais chuvoso do ano corresponde ao intervalo entre novembro e março, conforme pode ser conferido na Figura 18. Esta também é a época em que são mais recorrentes os registros de MGMs, na região.

FIGURA 18 - CLIMOGRAMA DO MUNICÍPIO DE MORRETES-PR A873 – INMET.



FONTE: A AUTORA (2020) A PARTIR DE GUIJARRO (2019) / DADOS: INMET (2019).

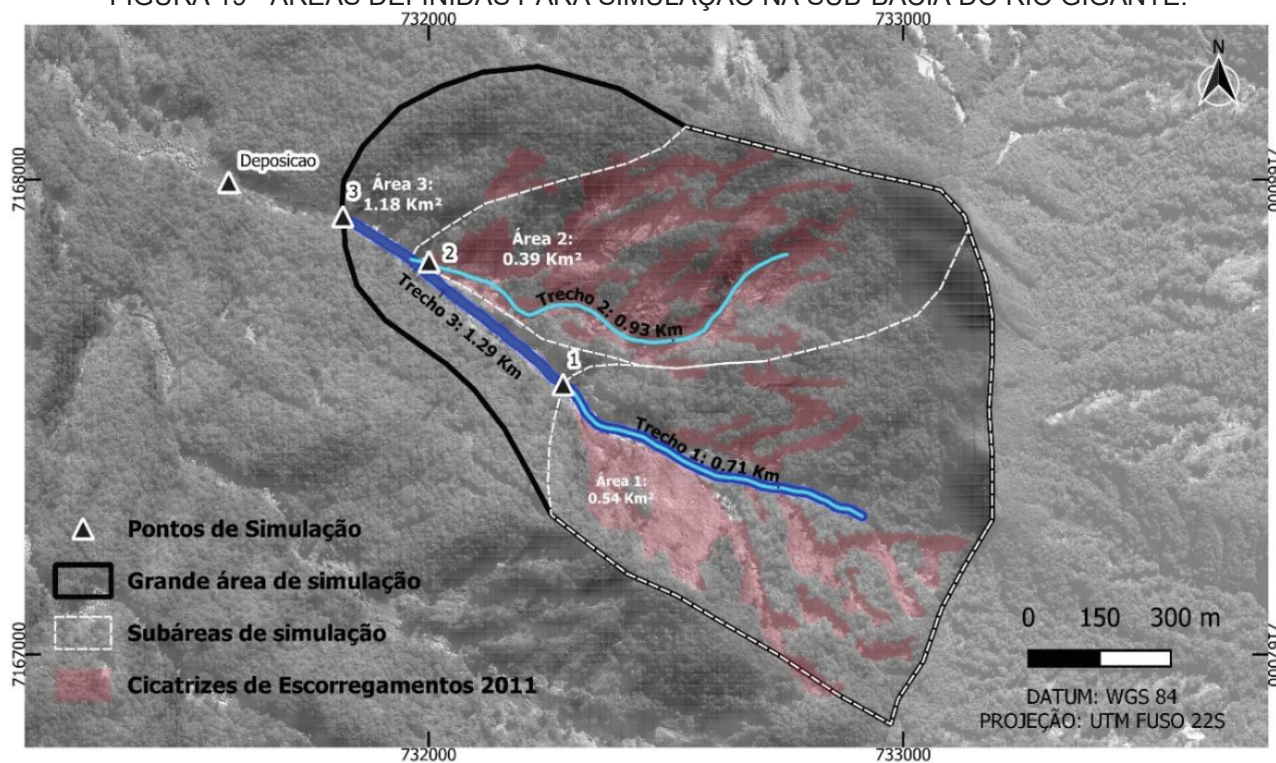
2.1 RECORTE TERRITORIAL PARA MODELAGEM DE FLUXO DE DETRITOS – A SUB-BACIA DO RIO GIGANTE

Especificamente no caso da modelagem de fluxo de detritos realizada no capítulo 6 e do cálculo do volume de detritos (solo e rocha) que consta no capítulo 5, foi considerada apenas a sub-bacia do rio Gigante como área de estudo, onde há trabalhos anteriores do LHG (Laboratório de Hidrogeomorfologia da UFPR) (BUENO et al., 2013; LOPES, 2019). O recorte se deve também a limitações metodológicas associada ao modelo utilizado. A localização dessa sub-bacia pode ser conferida na Figura 19.

Foram selecionadas três subáreas distintas da bacia do rio Gigante, correspondentes a três trechos de drenagem, para simulação dos fluxos e

comparação dos resultados obtidos. As subáreas foram definidas conforme configuração das cicatrizes/vertentes, cujos materiais escorregados nitidamente separaram-se em duas trajetórias. O ponto 1 corresponde ao ponto de aporte do material da subárea 1 ao rio Gigante. O ponto 2 corresponde ao ponto de aporte do material da subárea 2 ao rio Gigante. O ponto 3 corresponde ao ponto de aporte do material da subárea 3 – grande área de simulação - que corresponde às subáreas 1 e 2 somadas e mais uma porção sobressalente.

FIGURA 19 - ÁREAS DEFINIDAS PARA SIMULAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIO GIGANTE.



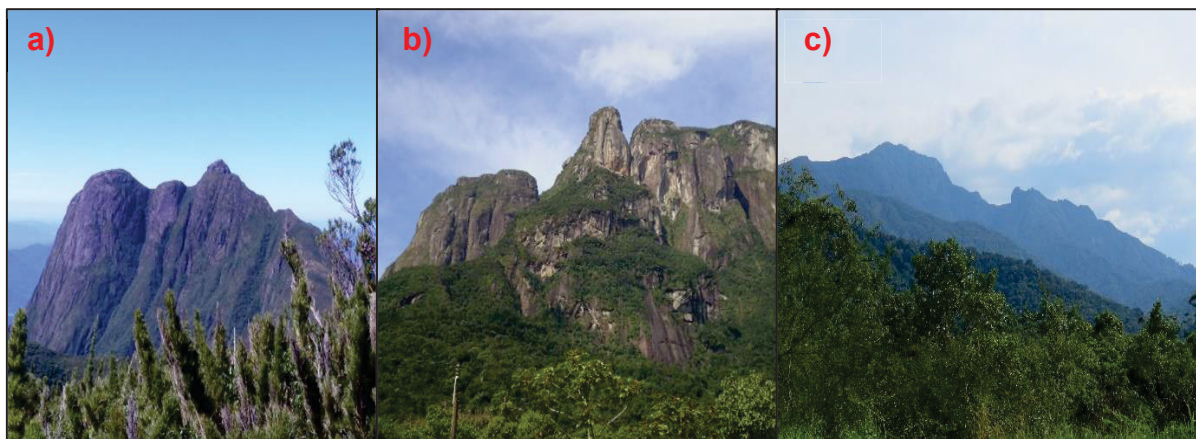
FONTE: A AUTORA (2021).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

3.1 A SERRA DO MAR PARANAENSE E OS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Do ponto de vista de sua estrutura geológica, a Serra do Mar paranaense pertence ao orógeno Ribeira, que é descrito por Salgado et al. (2019) como um “sistema de blocos separados por falhas transcorrentes orientadas no sentido NE”. Estas elevações são decorrentes dos processos de soerguimento do período Jurássico influenciados pela abertura do Oceano Atlântico meridional, que imprimiu forças distensionais neste sistema (MINEROPAR, 2006). Exemplos deste relevo no Paraná podem ser observados na Figura 20.

FIGURA 20 – A) CONJ. IBITIRAQUIRE (IBITIRATI, UNIÃO E PARANÁ) VISTO DESDE O ITAPIROCA. B) CONJUNTO MARUMBI. C) SERRA DA PRATA.



FONTE: A AUTORA (2016); VANDRÉ C. SANTOS (2016); A AUTORA (2019).

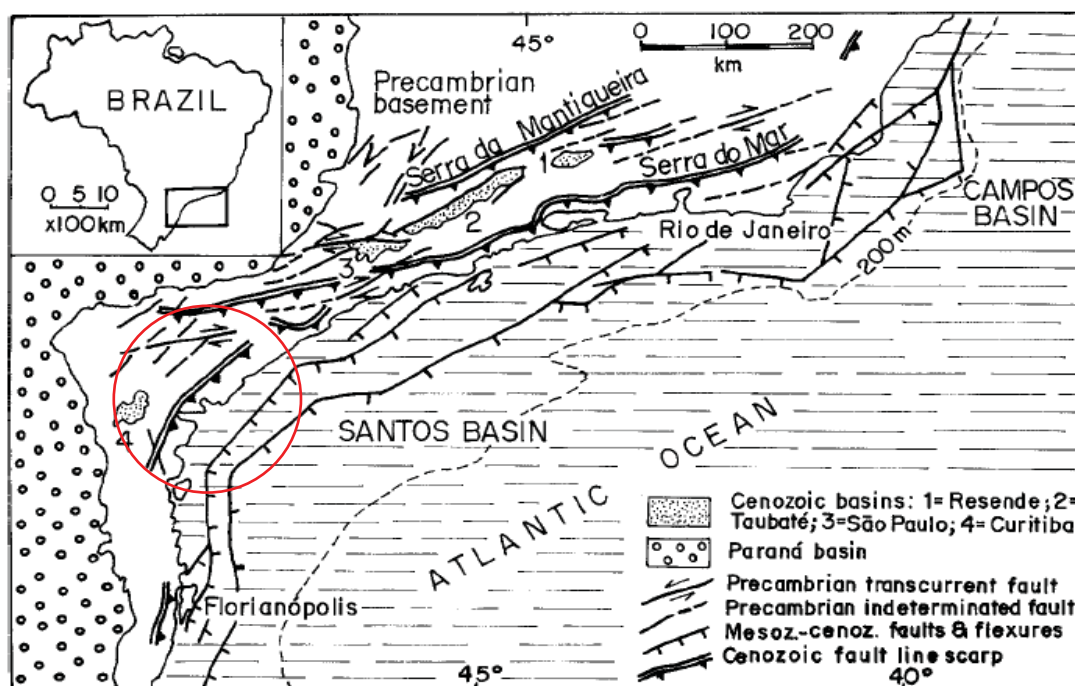
Suguiu e Martin (1996) colocam também a importância, no período Jurássico, deste evento “tectônico-magmático-sedimentar” e do processo subsequente, chamado reativação pós-paleozóica em que foram geradas as bacias marginais brasileiras. Durante o período Cretáceo, por volta de 90 milhões de anos atrás, a placa sul-americana passou por processos de soerguimento, vulcanismo e plutonismo (VIEIRA E GRAMANI, 2015).

Já durante o Paleoceno, esta linha escarpada resultante da separação dos continentes sofreu rebaixamentos junto a algumas linhas de falha, a exemplo do bloco rebaixado a leste da falha de Santos, sendo o remanescente mais elevado a oeste chamado de “Proto Serra do Mar”. De forma subsequente ocorreu a denudação destes blocos e o recuo erosivo da escarpa da Serra do Mar, que distava quilômetros

a leste de sua posição atual; seguido da deposição de material sedimentar nas bacias de Santos e do Paraná (MINEROPAR, 2006; VIEIRA E GRAMANI, 2015).

As mudanças associadas ao tectonismo ocorridas a partir do neógeno (terciário) são consideradas por Suguio e Martin (1996) conforme Obruchev (1948) como “neotectônicas”. No território brasileiro estas mudanças são menos perceptíveis em virtude da estabilidade tectônica. No período terciário ocorreu a reativação de falhas estruturadas durante a abertura do oceano Atlântico, o que pode ser observado a partir de rupturas em depósitos pleistocênicos. Estes processos de reativação, segundo Suguio e Martin (1996) geraram o chamado Rift Continental do Sudeste Brasileiro, apresentado pela FIGURA 21, em que se destaca a região deste estudo. A partir da figura é possível observar a coincidência entre a falha Cenozóica proposta e a localização e orientação da bacia do rio Jacareí (SSW-NNE).

FIGURA 21 - CENÁRIO TECTÔNICO DO SUDESTE BRASILEIRO COM DESTAQUE EM VERMELHO PARA A REGIÃO DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: SUGUIO E MARTIN (1996).

De forma similar, analisando a forma da bacia do rio Jacareí (NS) no contexto da orientação da baía de Paranaguá (EW), é possível associá-la a um dos estágios dos processos neotectônicos, conforme os mesmos autores: “a origem de grábens de tendências NS com preenchimento por sedimentação sintectônica, provavelmente no início do Holoceno, seria considerável para uma mudança na tensão de um regime

extensional em sentido EW. Um exemplo é a formação geológica deposicional do terço inferior da bacia de estudo, constituída por depósitos cenozoicos, que aparecem em amarelo no mapa disposto na Figura 8. Os sedimentos encontrados nesta região são arenosos.

Para Ab'Saber (1955):

“o passado remoto liga-se aos fins do cretáceo e eocênico, quando se processaram os grandes falhamentos do Brasil Sudeste, responsáveis pela gênese das principais escarpas de falhas do Planalto Atlântico. O passado mais recente, localizado em pleno cenozoico e no quaternário, está ligado aos relevos epicíclicos da zona costeira, balizados pelos seus baixos níveis e relacionados com a interferência dos movimentos epirogênicos e eustáticos”.

Em meio aos aspectos estruturais ocorre também o clima, que contribui para a formação desta região e para a proeminência da Serra do Mar na paisagem (De Martonne, 1943; Bigarella et al., 2016), com processos de dissecação, exumação, transporte e arredondamento de seus blocos. Ainda, os níveis pluviométricos podem interferir significativamente no ciclo hidrológico a ponto de levar a um acréscimo de vazão, favorecendo a dissecação das vertentes.

Outro aspecto importante associado ao clima, em especial na região litorânea é a eustasia, influente de duas principais maneiras: a inundação direta nos períodos de transgressão; e o aumento do nível de dissecação das vertentes diante do rebaixamento do nível de base em períodos de regressão. Atualmente o clima da Serra do Mar favorece o intemperismo. Mas nem sempre o clima da região foi assim, tendo alternado entre períodos secos e úmidos, conforme coloca Bigarella (2016):

“As flutuações climáticas efetivas nas fases úmidas foram responsáveis por erosão conspícua e por esculpir boa parte da paisagem topográfica atual”.

Assim como o extraordinário evento de 2011 que conferiu grande poder de transporte às drenagens locais, estes processos induzidos pelo clima estão em alguma medida relacionados à composição do relevo atual, seja por causa de rápidos

eventos extremos ou de processos de lenta denudação. Villaça-Gomes *et al.* (2022) comprovaram a partir de estudos com o Be¹⁰ que os fluxos de detritos, considerados como movimentos gravitacionais extremos, são agentes relevantes na evolução da paisagem e no recuo erosivo mencionado, a despeito de sua baixa recorrência. Na bacia hidrográfica do rio Jacareí, isto se evidencia pelos depósitos coluvionares e de tálus, bastante comuns na região.

3.2 OS FLUXOS DE DETRITOS

Fluxos de detritos são tidos globalmente como alguns dos mais relevantes tipos de movimentos gravitacionais de massa por seu poder de impacto e pela larga dimensão de seu alcance (JAKOB E HUNGR, 2005). Eles decorrem da ação da gravidade sobre materiais presentes nas vertentes (rochas, solo, vegetação), o que implica em um comportamento fluido geralmente potencializado ou causado pela presença da água. O aumento da pressão de saturação do solo contribui para a desestabilização de grandes volumes, induzindo frequentemente à ocorrência de escorregamentos em ambientes tropicais. Quando nestas situações o material atinge canais fluviais transportados pela gravidade e pela vazão incrementada por eventos de chuva, configuram-se os fluxos de detritos iniciados a partir de escorregamentos (TAKAHASHI, 2014). Há tendência para formação de fluxos de detritos nestes contextos em especial em locais onde ocorrem sub-bacias confinadas (BRUMMER, 2006). Intrinsecamente, o relevo brasileiro da Serra do Mar dispõe de diversos locais com esta propensão.

Uma das definições mais difundidas acerca dos fluxos de detritos é a de Varnes (1978), segundo o qual eles são marcados pela presença de material não consolidado, de líquidos, e pela alta velocidade do fluxo. Iverson (1997) define que os fluxos de detritos ocorrem quando “sedimentos mal selecionados, agitados e saturados com água, desprendem-se vertente abaixo como resposta à atração gravitacional”. Este autor também destaca a importância e predominância dos fluidos neste processo, visão em partes corroborada por Takahashi (2007). Para este autor, um fluxo de detritos se constitui quando o movimento de massa se comporta segundo a dinâmica dos fluidos. Esta dinâmica é o que determina o largo alcance da mobilização de uma massa nesse tipo de movimento. Sem ela, os sedimentos limitam-se a atingir distâncias proporcionais à massa mobilizada, e depositam-se

conforme as condições de declividade/gravidade e o ângulo de repouso dos materiais, sem maior propagação (IVERSON et al., 1997).

Há diversas formas pelas quais deflagram-se fluxos de detritos, sendo que Iverson et al. (1997) destacam que o início se dá pela falha gravitacional de volumes e de sedimento encharcados ou de rochas. Os mesmos autores, a partir de estudos experimentais, registram a importância da pressão de saturação dos poros na mobilização destes volumes, especialmente em solos residuais ou em rochas fraturadas. Também possui grande relevância a extensão da área encharcada, o que induz efeitos como o aumento da tensão de cisalhamento e o rompimento das forças coesivas do solo, e alterações no volume aportado. Na sequência do rompimento, é comum que estes sedimentos encontrem vertentes condutoras ou cursos d'água, especialmente em um contexto de aumento de vazão decorrente de chuvas intensas, situação colocada por Takahashi (2014) como um dos tipos possíveis de fluxo de detritos.

Entretanto, a grande potência destrutiva dos fluxos de detritos não provém apenas do poder de transporte do fluxo da água, e sim das propriedades mecânicas que adquire na interação com sedimentos finos, como a argila e silte. A liquefação dos solos, o movimento constante e o aporte intensivo de materiais oriundos das vertentes escorregadas compõem uma massa líquida e densa que constitui o fluido intersticial. Nesta massa, operam o empuxo e a viscosidade na supressão da turbulência que caracterizaria o contato entre sedimentos de partículas muito distintas, de grãos a blocos, e que poderia limitar o alcance da deposição e do transporte do material. Desta forma, o fluxo consegue transportar grandes volumes e se comportar como uma espécie de bloco, apesar de ser heterogêneo (TAKAHASHI, 2014). Isto confere a ele um grande poder de alcance e arraste. Com a suavização do relevo que costuma ocorrer em direção à planície, o material mobilizado vai sendo depositado, tendo as partículas mais finas maior potencial de alcance a partir do transporte. Conforme se depositam ao longo do trajeto, os materiais exercem influência sobre as porções subsequentes dos fluxos que vêm de montante.

Diante da importância da água para este fenômeno, vê-se que, sobretudo no contexto brasileiro, ele está diretamente relacionado ao regime de chuvas e à disponibilidade hídrica de um local, que é determinante para a dimensão e para o alcance dos fluxos. A vegetação também influencia este processo de diversas formas,

com destaque para aquelas relacionadas à gênese dos escorregamentos; e aquelas relacionadas aos restos vegetais como detritos lenhosos transportados pelos fluxos ou influenciando a trajetória deles. A primeira consiste na contribuição positiva ou negativa para a estabilidade das encostas, respectivamente a partir da coesão das raízes e do peso da vegetação (WU et. al, 1984). E a segunda está mais associada à dinâmica dos fluxos por meio dos possíveis barramentos causados pelos detritos lenhosos ao longo dos canais fluviais.

Diante das características da paisagem da Serra do Mar, há três principais processos hidrogeomorfológicos a partir dos quais deflagam-se os fluxos de detritos. Eles envolvem a ocorrência de escorregamentos e a chegada desse material às calhas das drenagens locais; a direta liquefação dos solos no entorno das drenagens; e a reescavação dos leitos fluviais. Estão associados a isso os depósitos de colúvios e tálus característicos dos sopés dos afloramentos rochosos da Serra do Mar, onde há material já movimentado e também material disponível para nova movimentação. Os altos volumes de precipitação que incidem sobre a região contribuem para o intemperismo deste material e eventualmente provocam a mobilização dele, culminando nos movimentos gravitacionais de massa.

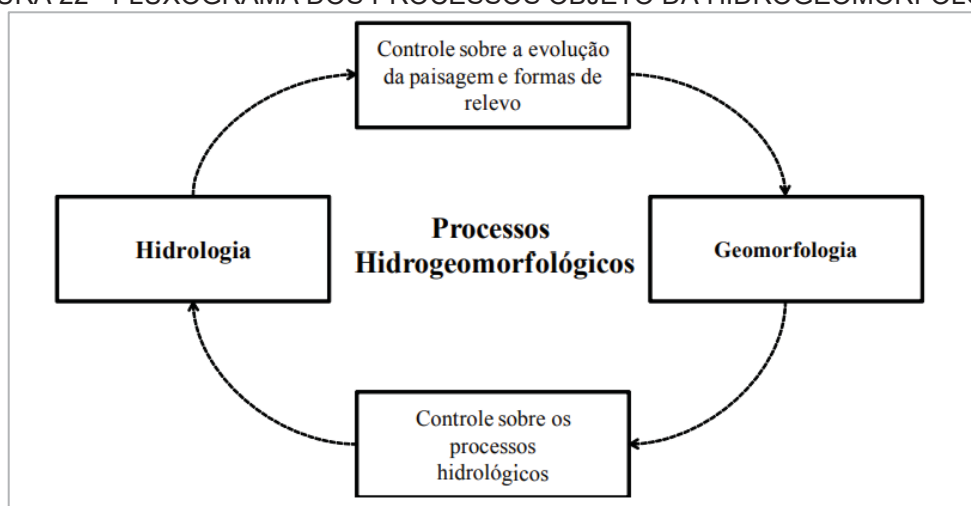
O princípio desta associação entre o volume pluviométrico e as condições intrínsecas de estabilidade do terreno é sustentado por Reid et al. (1997) que testaram condições de estabilidade com variação do acumulado e da duração de chuva em bacias experimentais. Este trabalho sugere que a precipitação foi determinante para a ocorrência de alguns escorregamentos, bem como sua intensidade acelerou processos de rompimento e transporte de forma “dramática”. As condições hidrológicas são, portanto, fatores importantes na ocorrência de fluxos de detritos pois conferem a eles a fluidez - sua característica mais distinta em relação aos outros tipos de movimentos gravitacionais de massa. Neste sentido, é fundamental compreender as condições de aporte pluviométrico e as características da bacia que conduzem os processos em estudo.

3.3 O PARADIGMA DA HIDROGEOMOROFLOGIA

Como observado no levantamento bibliométrico supracitado, no contexto da bacia hidrográfica do rio Jacaréí existe a necessidade de maior discussão sobre fatores relacionados à ocorrência de MGMs e à evolução do relevo enquanto processo

contínuo e complexo, que supera condições de simulação instantânea (GOERL et al., 2012). Diante da forte interação entre fatores de chuva e relevo na bacia e na dinâmica da paisagem da Serra do Mar, julga-se essencial pensar estes fenômenos pela perspectiva da hidrogeomorfologia (SCHEIDEGGER, 1973; SIDLE E ONDA; 2004). Neste trabalho, este é o paradigma de análise da importância dos fatores de ocorrência para os fluxos de detritos, aspecto ainda pouco explorado como aponta o levantamento da FIGURA 5. A forma como os aspectos hidrológicos e geomorfológicos interagem dinamicamente na evolução da paisagem pode ser representada conforme a Figura 22.

FIGURA 22 - FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS OBJETO DA HIDROGEOMORFOLOGIA.



FONTE: GOERL *et al.* (2012).

O entendimento dos fatores hidrogeomorfológicos de influência para os MGMs na bacia hidrográfica do rio Jacareí pode contribuir para discussões sobre a dinâmica e evolução das formas de relevo desta porção da Serra do Mar. Além da contribuição para este debate no âmbito da ciência, este tipo de estudo contribui eventualmente para áreas do planejamento e de gestão territorial, como tem sido colocado no âmbito da hidrologia com a sócio-hidrologia (KOBAYAMA *et al.*, 2018), e de áreas correlatas que tem se voltado à redução de risco de desastre (KOBAYAMA, CAMPAGNOLO e GOERL, 2021). A busca deste entendimento dos fluxos de detritos na bacia hidrográfica do rio Jacareí a partir dessas duas frentes está associada, portanto, à forma como os pesquisadores da área da hidrogeomorfologia tem observado este tema.

4. ÁGUAS DE MARÇO: ORIGEM E EXCEPCIONALIDADE DE EVENTO EXTREMO DE PRECIPITAÇÃO OCORRIDO NA SERRA DO MAR PARANAENSE

4.1 INTRODUÇÃO

Um evento de precipitação é considerado extremo quando a intensidade, a duração ou o acumulado de chuva têm valores expressivos e atípicos para uma determinada região. Estes valores variam conforme autores ou institutos de monitoramento pelo mundo. Em vista disso, alguns dos métodos mais utilizados para esta definição consideram a distribuição das frequências de acumulados de chuva em uma série histórica de dados e a excedência de um limiar percentual. Pode-se citar, por exemplo, os episódios em que o registro pluviométrico de um único dia supera o acumulado em 99 ou 95% dos outros dias da série (USGCRP, 2021; EPA, 2021). É recorrente também que a chuva seja classificada em cada local qualitativamente a partir da intensidade registrada, forma mais acessível ao público não especializado. Algumas classificações desse gênero podem ser observadas na Tabela 2.

TABELA 2 - EXEMPLOS DE CATEGORIAS DE CLASSIFICAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO POR INTENSIDADE.

Instituição	Categorias				
IPMA (Aguaceiro)	Fraco	Moderado		Forte	Violento
	<2 mm/h	>2 e <10 mm/h		>10 e <50 mm/h	>50 mm/h
WMO	Fraca	Moderada		Forte	Violento
	<2,5	>2,5 e <10 mm/h		>10 e <50 mm/h	>50 mm/h
Alerta RJ	Fraca	Moderada		Forte	Muito Forte
	<5 mm/h	>5 e <25 mm/h		>25,1 e <50 mm/h	>50 mm/h
Protección Civil de España	-	-	Forte	Muito Forte	Torrencial
			>15 e <30 mm/h	>30 e <60 mm/h	>60 mm/h

FONTE: A AUTORA (2021) A PARTIR DE IPMA (2021), WMO (2004), ALERTA RJ (2020) E PROTECCIÓN CIVIL DE ESPAÑA (2020).

Outra maneira usada para expressar numericamente a magnitude dos eventos de precipitação se dá a partir do cálculo do período de retorno (T_r), muito utilizado para dimensionamento de projetos de engenharia. Este valor representa o tempo médio esperado de intervalo entre duas ocorrências que igualem ou superem determinado valor de precipitação (MAIDMENT, 1993; COLLISCHONN e DORNELES, 2013). O período de retorno é determinado a partir da frequência com que um índice pluviométrico é atingido na série observada. Quando há disponibilidade de séries extensas, a determinação empírica do período de retorno é factível. Contudo, quando as séries são curtas, como em geral ocorre no Brasil, utilizam-se

distribuições de probabilidade teóricas. Em relação à resolução temporal da análise, quando o objeto de estudo são valores diários, horários ou sub-horários, a distribuição dos dados não equivale à forma gaussiana, em especial com relação aos valores extremos. Dessa maneira, para calcular o tempo de retorno de eventos pluviométricos extremos em resolução temporal de maior detalhe, é necessário utilizar outros tipos de distribuição. A distribuição mais utilizada para este fim nas últimas décadas tem sido a distribuição de Gumbel. Entretanto, já se provaram as limitações deste paradigma (KOUTSOIYANNIS, 2003), pelo que vêm-se adotando variações das distribuições GEV - Generalized Extreme Values, sintetizadas por Jenkinson (1995) para este fim, com o ajuste de parâmetros por meio de máxima verossimilhança. A forma geral da função GEV de distribuição cumulativa é:

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (1)$$

Em que:

- x é variável cuja probabilidade/frequência se deseja obter;
- exp é a função exponencial;
- ξ é o parâmetro de forma;
- μ é o parâmetro de localização e
- σ é o parâmetro de escala.

De acordo com o ajuste ótimo dos parâmetros aos dados, esta distribuição pode assumir três tipos distintos: Tipo 1 – Gumbel, para $\xi = 0$; Tipo II – Frechét, para $\xi > 0$; e Tipo III – Weibull para $\xi < 0$. Esta função retorna a probabilidade de uma precipitação de certa magnitude ser igualada ou superada, de acordo com o período de retorno associado.

Em relação à origem de eventos extremos de chuva, eles podem estar associados a mecanismos de circulação atmosférica de escalas variadas e/ou a convergência de fenômenos distintos, podendo implicar em precipitações excepcionalmente intensas de acordo também com Garreaud e Aceituno (2007). Conforme levantamento realizado por Reboita et al. (2010), há diversos sistemas atmosféricos atuando sobre a região sudeste do continente sulamericano. Dentre outros processos, os autores destacam: os aportes feitos pelos jatos de baixos níveis

(JBNs), eventualmente associados a complexos convectivos de mesoescala (CCMs); as linhas de instabilidade pré-frontais, os bloqueios atmosféricos e as nuvens vírgula-invertida; e a brisa marítima e as regiões ciclogênicas ao longo da costa austral brasileira. Garreaud e Aceituno (2007) também destacam a importância da vegetação e de feições topográficas como a cordilheira Andina, que influencia na circulação troposférica e os oceanos Pacífico e Atlântico que estabelecem condições de contorno para os sistemas atuantes sobre o continente.

Alguns desses processos são acentuados durante o verão, época em que o aquecimento do continente promove maior convecção geradora de nebulosidade, especialmente em áreas quentes e com grande disponibilidade hídrica. Além dos oceanos, são exemplos destes locais algumas regiões continentais como a Amazônia, o Pantanal e o Chaco. Reboita et al. (2010) e Teixeira e Satyamurty (2006) destacam que jatos de norte ocorrem eventualmente ao mesmo tempo em que jatos de altos níveis de oeste e a combinação entre ambos direciona os sistemas gerados a leste dos Andes para a região sul do Brasil (JUNQUIAS et al., 2015). Nesta época também são recorrentes os CCMs na região centro oeste da América do Sul, que tendem a se deslocar para leste ou sudeste. Estes sistemas podem gerar precipitações ao sul da latitude 20°, como apontam Santos e Nascimento (2013).

Conforme Vanhoni e Mendonça (2008), no caso da porção litorânea da região Sul do Brasil, o transporte de umidade do oceano tem grande relevância, acentuando as condições favoráveis à incidência de chuvas prolongadas e intensas, principalmente em baixos níveis. Terassi e Galvani (2017) também destacam o aporte da maritimidade, não dissociando-a da importância da Serra do Mar como fator topográfico de influência sobre a circulação atmosférica local.

Além dos mecanismos de circulação, estudos em todo o mundo indicam a relevância da orografia para a amplitude térmica e para a precipitação. Lin e Chiao (2001), por exemplo, levantaram aspectos sinóticos e de mesoescala relacionados à chuva orográfica em regiões da China, dos Estados Unidos e da Europa. Entre os fatores identificados, destacam-se: a moção vertical de alto potencial carregando umidade forçosamente para cima; a preexistência de um sistema convectivo com pouca ou nenhuma mobilidade; e a instabilidade condicional ou potencial de um fluxo movendo-se para montante. Além disso, os autores destacam a recorrência do

encontro dos jatos de baixos níveis com a orografia, e a associação deste processo com a ocorrência de chuvas muito intensas nas regiões estudadas.

A precipitação extrema de grande intensidade em escala subdiária pode estar associada a quaisquer destes fatores supracitados, isoladamente ou em conjunto. Em contrapartida, precipitações extremas associadas a chuvas de longa duração tendem a estar associadas à coincidência de diversos mecanismos. Situações análogas foram observadas por Kang et al. (2019) quanto à ocorrência simultânea de cavados ligados a ventos de oeste, as correntes de jato e a orografia; e por Goswami et al. (2009), na relação entre sistemas multiescalares e a topografia, com a persistência da chuva.

Na região da Serra do Mar paranaense concorrem todas os fatores acima descritos implicando na chegada e na estacionariedade de massas úmidas sobre a região (DE MELLO et al., 2017). Um caso notório de chuva extrema ocorreu em 11 de março de 2011 na bacia hidrográfica do rio Jacareí – delimitada a leste pela Serra da Prata, porção paranaense da Serra do Mar. Desencadearam-se escorregamentos e houve grande mobilização de blocos e detritos lenhosos, conduzidos por forte fluxo de água e sedimentos como observado em fotos anteriores.

Conhecimentos acerca da gênese, da frequência e da magnitude dos eventos de precipitação são relevantes para o entendimento da dinâmica hidrogeomorfológica do episódio e das respostas locais possíveis às chuvas extremas. Com a existência de perspectivas e tendências de agravamento da precipitação no local (NASCIMENTO et al. 2020; DE MELLO et al., 2017; REGOTO et al., 2021); com os efeitos ainda desconhecidos das mudanças climáticas no local; e com a expansão dos centros urbanos sobre áreas de perigo, este estudo torna-se relevante para a gestão territorial e de risco de desastres na Serra do Mar paranaense. Portanto, em relação ao episódio Águas de Março ocorrido na bacia hidrográfica do rio Jacareí, os objetivos deste trabalho são: a identificação da gênese atmosférica; e a caracterização da magnitude e da excepcionalidade da precipitação ocorrida.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram empregados diferentes métodos para cada objetivo deste trabalho. As questões, os dados, os métodos e as ferramentas utilizadas podem ser verificados no Quadro 2.

QUADRO 2 - QUADRO GERAL DE MÉTODOS EMPREGADOS NESTE CAPÍTULO

PROBLEMA	DADOS/RECURSOS	MÉTODO	FERRAMENTAS
Determinar a gênese atmosférica do fenômeno	Cartas sinóticas Imagens GOES 12 Boletins meteorológicos da época	Observação e catálogo das trajetórias dos sistemas atmosféricos, estabelecendo uma sequência temporal de fenômenos	QGIS - Buffers e outras operações vetoriais
Avaliar a importância da orografia para a incidência de precipitação	Imagens MODIS/AQUA	Avaliação da posição dos sistemas atmosféricos em relação às formas de relevo.	QGIS
Caracterizar anomalias de pressão, vento e umidade durante o evento	Dados de reanálise climática NCEP/NCAR e ECMWF	Observação dos dados	
Determinar a magnitude e a excepcionalidade do evento	Dados INMET estação Morretes – A873	Critério de 6 h de separação para determinação de eventos de precipitação, obtendo horas de chuva, chuva efetiva, precipitação, médias e intensidades	Análise e manejo de dados por meio da linguagem R
Gerar as curvas IDF e definição do tempo de retorno da precipitação do Águas de Março	Dados INMET estação Morretes – A873	Distribuição generalizada de valores extremos com dependência da duração dos eventos ajustada aos dados por meio de máxima verossimilhança	Pacote IDF (R)

4.2.1 Circulação Atmosférica

Com o objetivo de compreender a gênese atmosférica do evento extremo de precipitação a que foi submetida a bacia hidrográfica do rio Jacareí em março de 2011, foram analisadas 23 cartas sinóticas de superfície correspondentes aos momentos de maior intensidade de precipitação registrados no entorno do local. Estes momentos correspondem ao período entre as 21 horas do dia 08/03/2011 e as 15 horas do dia 14/03/2011, em horário local e com intervalos de 6 horas entre as imagens (CPTEC, 2021). Da mesma forma, foram observados os boletins meteorológicos dos períodos correspondentes.

Além das cartas sinóticas, foram analisadas imagens de sensores do satélite geoestacionário GOES-12 – dentre os melhores disponíveis à época. As imagens foram obtidas através da plataforma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC, 2021). A análise deste material correspondeu ao período entre 07 a 14 de março de 2011. Em relação às imagens GOES-12 foram analisados dados de imageamento dos canais 2, 3, 4 e de composições coloridas. Respectivamente, eles evidenciam a circulação em baixos níveis; a presença de vapor d'água em altos níveis e ventos; a precipitação; e a nebulosidade. Como complemento a estas imagens, foram coletados e utilizados dados de Reanálise Climática gerados pela *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP/NCAR) e pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), para diversas variáveis.

Ainda, utilizaram-se imagens do sensor MODIS providas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS, 2019). Os produtos deste sensor têm 1 km de resolução espacial, e vêm sendo utilizados em análises de possíveis indícios das influências da orografia sobre a atuação dos sistemas atmosféricos (SMITH e EVANS, 2007; SANDU e VAN NIEKERK, 2018; SMITH, 2008). Como forma de explorar as relações entre a nebulosidade observada nas imagens e a precipitação registrada por pluviômetros no território, foram obtidos do INMET os máximos de precipitação registrados em todo território nacional nos dias 10, 11 e 12 de março de 2011.

4.2.2 Evento Extremo de Precipitação

Em relação à compreensão da magnitude do evento frente ao histórico de precipitação na bacia, foram tratados e analisados os dados do posto pluviométrico

“Colônia Santa Cruz” em atividade desde junho de 1974. Este posto localiza-se no sopé da face leste da Serra da Prata, a aproximadamente 5,5 kms das vertentes onde ocorreram os principais escorregamentos na bacia do rio Jacareí (conforme a Figura 7). Essa estação é convencional e possui registros diários. Anteriormente, ela era administrada pelo ÁGUASPARANÁ, hoje incorporado ao Instituto Água e Terra, autarquia estadual paranaense.

Os dados do posto Colônia Santa Cruz são suficientes para evidenciar a singularidade do Águas de Março em relação ao contexto histórico da bacia. Contudo, dados diários não possuem descrição temporal suficiente para o detalhamento da intensidade horária da precipitação. Esta avaliação é importante uma vez que episódios de chuva muito intensa têm maior possibilidade de contribuição como deflagradores de desastres ou estopins de situações de umidade (REID et al., 1997), o que é mais bem observado numa escala sub-diária.

Dessa forma, observaram-se os dados horários da estação meteorológica Morretes - A873 (INMET, 2021) instalada em 2008 e localizada próximo ao centro da cidade de Morretes, a aproximadamente 10 kms do rio Jacareí (Figura 7). Os registros avaliados têm início em 13 de março de 2008 e final em 30 de junho de 2019, e compreendem as variáveis pressão atmosférica (hPa), radiação global (KJ/m²), precipitação (mm), temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (°C), direção do vento (°) e velocidade do vento (m/s).

As análises das séries de dados das estações foram desempenhadas por meio da linguagem R. Da mesma forma foi criado um subconjunto de dados cujos registros correspondem aos eventos de precipitação considerados em blocos, com registros do acumulado e da duração do evento desde o início (precipitação acima de 1 mm) até o término. Para isto, utilizou-se o critério de 6 horas de período seco como marco da separação entre dois eventos pluviométricos, conforme proposto por Huff (1967).

O estabelecimento dos eventos de chuva possibilitou a análise deles sob aspectos como a intensidade média e máxima, a duração e o acumulado pluviométrico, bem como as curvas de Intensidade-Duração-Frequência para a região, com os respectivos períodos de retorno para os eventos de interesse. Utilizou-se a ferramenta recentemente proposta por Ulrich et al. (2020) viabilizou a parametrização das GEV em conjuntos de estações e considerando a duração da precipitação como fator de dependência. Essas funções foram implementadas na

linguagem R no pacote IDF, utilizado neste estudo. Primeiramente foram agregados os dados para obtenção das máximas intensidade anuais, para cada duração. Posteriormente foram estimados os parâmetros μ – localização modificada, σ – escala deslocada, θ – forma, ε e ε^2 – durações deslocadas, τ – expoente de duração, por meio de máxima verossimilhança aplicada sobre as máximas observadas para cada duração. Durante a aplicação observou-se que as séries do ano de 2008 e 2009 possuíam demasiadas falhas e faziam com que as intensidades médias de precipitação baixassem muito, sendo retiradas na segunda rodada desse ajuste. A qualidade do ajuste do modelo em relação às funções empíricas possíveis foi observada por meio de diagramas de resíduos.

Os episódios associados ao evento Águas de Março foram analisados a partir de técnicas de estatística descritiva e comparados de acordo com a sazonalidade das chuvas. Analisaram-se a precipitação horária e os eventos singularizados de chuva; o acumulado e a intensidade de toda a série, com destaque para o período entre 7 e 13 de março de 2011.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Gênese do Evento Extremo de Precipitação

Apesar do destaque ganhado pelo evento extremo na bacia do rio Jacaré e dos graves impactos ali provocados, há registro de chuvas volumosas em outras localidades da região Sul. São exemplos os 240,4 mm precipitados entre os dias 10 e 11 de março (48 horas) em Rio Grande-RS, e 113 mm registrados no dia 13 de março em Florianópolis. A Tabela 3 dispõe dos dados de máximas diárias para algumas localidades do Brasil, conforme as estações do INMET, e serve à comparação entre os dados das observações remotas e as observações do monitoramento em superfície.

TABELA 3 - MÁXIMAS DIÁRIAS REGISTRADAS NOS PLUVIÔMETROS DO INMET NO BRASIL.

	DIA 10/03/2011		DIA 11/03/2011		DIA 12/03/2011	
	ESTAÇÃO INMET	Valor (mm)	ESTAÇÃO INMET	Valor (mm)	ESTAÇÃO INMET	Valor (mm)
1	RIO GRANDE-RS	132.5	RIO GRANDE-RS	107.9	MORRETES-PR	268.4
2	ITACOATIARA-AM	115.0	RIO GRANDE-RS	106.6	PARANAGUA-PR	159.0
3	PRESIDENTE FIGUEIREDO-AM	110.6	TRIUNFO-RS	99.5	MARINGA-PR	127.2
4	RIO GRANDE-RS	107.0	MORRETES-PR	98.8	MARINGA-PR	122.6

	DIA 10/03/2011		DIA 11/03/2011		DIA 12/03/2011	
	ESTAÇÃO INMET	Valor (mm)	ESTAÇÃO INMET	Valor (mm)	ESTAÇÃO INMET	Valor (mm)
5	ITAPETINGA-BA	105.6	PARANAGUA-PR	84.0	MARABA-PA	122.4

FONTE: A AUTORA (2021).

A despeito da diversidade climática nacional, pôde-se notar que as chuvas na região Sul tiveram relevância nestes três dias, com volumes expressivos que superaram os demais registros no país. Ademais, conforme já era previsto, o pluviômetro localizado em Morretes registrou a maior altura de chuva entre todas as estações do INMET no dia 12. A seguir são detalhadas algumas das observações feitas sobre dados do evento e da observação de cartas sinóticas (superfície) e imagens de satélite em sequência cronológica, dispostas nas Figura 23 (registros sinóticos em superfície), Figura 24 (imagens do satélite GOES-12), Figura 25 e Figura 26 (produtos de reanálise) e Figura 27 (imagem do satélite MODIS).

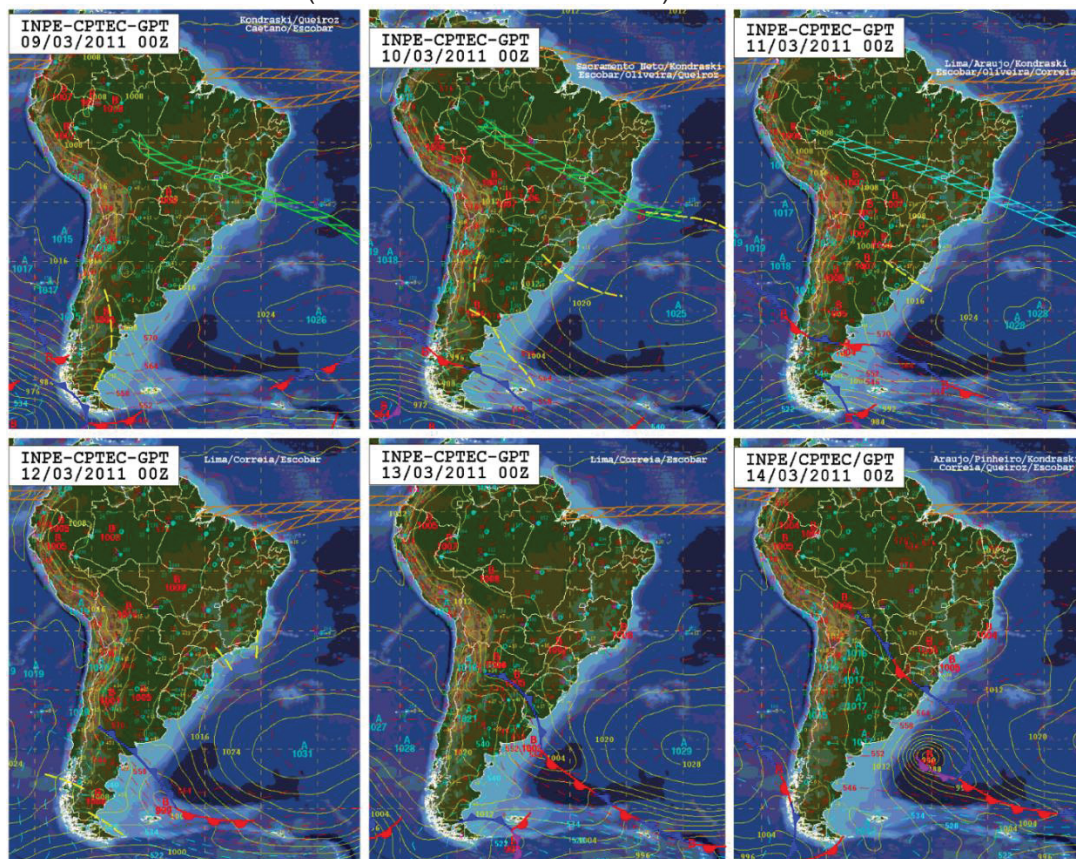
As imagens da Figura 23 indicam no início da tarde do dia 10 a formação de nebulosidade sobre Rio Grande do Sul e Santa Catarina, evidenciando a intensificação da atuação de um cavado sobre a região. Já nesta fase nota-se o aporte de umidade do oceano ao sistema, além de ventos oriundos de oeste, com possível influência de um sistema de baixa pressão atmosférica na região do Chaco, do Paraguai e do norte da Argentina (Massa Tropical Continental). A atuação das células anticiclônicas, e em especial o Anticiclone do Atlântico Sul, favoreceu a permanência da nebulosidade sobre a região Sul do país, exercendo força contrária à dispersão do sistema que poderia ter ocorrido com os ventos de oeste. Estas condições provocaram já entre os dias 10 e 11 acumulados de precipitação superiores a 100 mm em 24h no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina.

Quanto à região deste estudo, nota-se no dia 11 o aparecimento de linhas de instabilidade entre os estados do Paraná e São Paulo. Nesse período, foi possível verificar a formação de múltiplos núcleos de nebulosidade por convecção em quase todo o país, em associação com os sistemas atuantes no Brasil central e a instabilidade provocada pelos cavados na massa de ar tropical atlântica. O fluxo de ar demonstrou uma trajetória em direção à região Sul do Brasil, com registro de ventos fortes sobre o Paraná, o que se estenderia até o dia 12.

A Figura 23 destaca na imagem colorida a abrangência da nebulosidade mais densa associada aos cavados e ao fluxo de umidade. A figura destaca ainda duas

imagens com temperatura realçada no canal infravermelho, mostrando que, ao meio-dia de 11 de março, havia dois sistemas de células convectivas avançando pelas laterais de Morretes-PR (oeste-leste).

FIGURA 23 - CARTAS SINÓTICAS DE SUPERFÍCIE DAS 21 HORAS DOS DIAS 8 A 13 DE MARÇO DE 2021 – HORÁRIO LOCAL (9 A 14/03/2011 – 00Z – GMT).



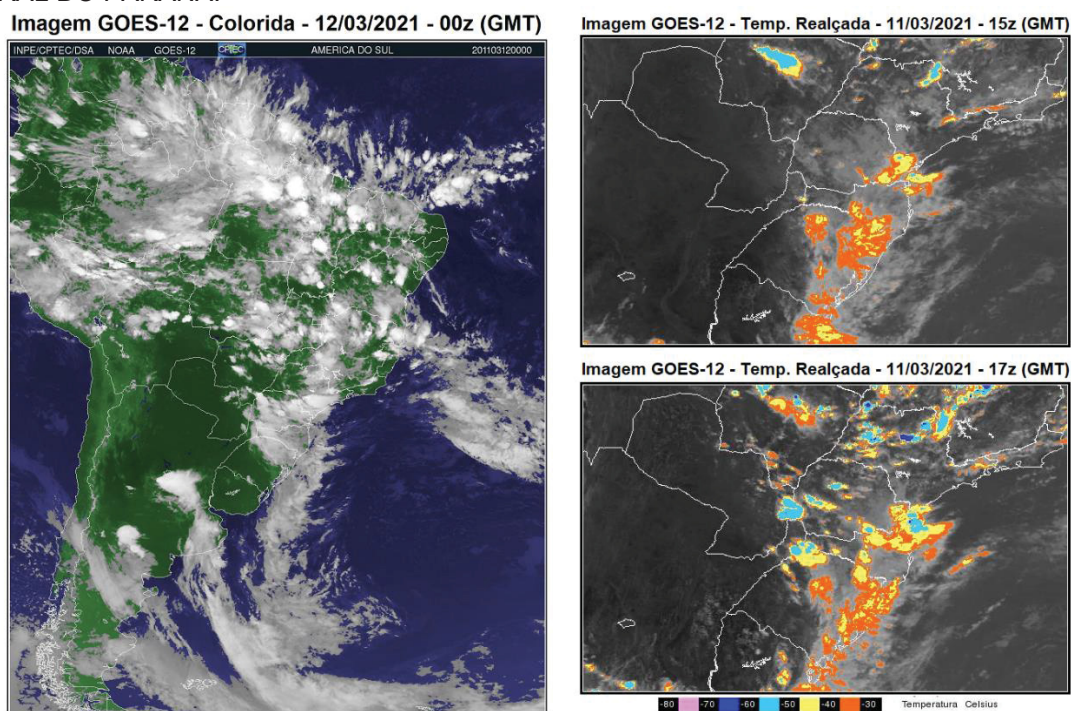
FONTE: CPTEC (2021).

Estas células convergiram posteriormente sobre o município provocando um risco potencial de tempestades, condição que perdurou por várias horas na região. Por volta das 14 horas, a temperatura de topo da nuvem superava -60°C e o núcleo situava-se justamente sobre a área de estudo (ponto azul escuro em destaque no litoral do Paraná na imagem das 17z).

Em relação aos dados de reanálise climática, a porção esquerda da Figura 24 expõe um mapa de anomalia de pressão atmosférica ao nível do mar entre os dias 10 a 13 de março. A imagem indica uma expressiva anomalia positiva relacionada ao Anticiclone do Atlântico Sul (posicionada mais ao sul do que o habitual), a oeste da qual se observa uma anomalia negativa, próximo ao litoral da Argentina. Ao norte deste ponto observa-se uma região de baixa pressão relacionada às ZCAS que ocorreu nos dias anteriores, e ajudou a dificultar o avanço de massas de ar. Toda

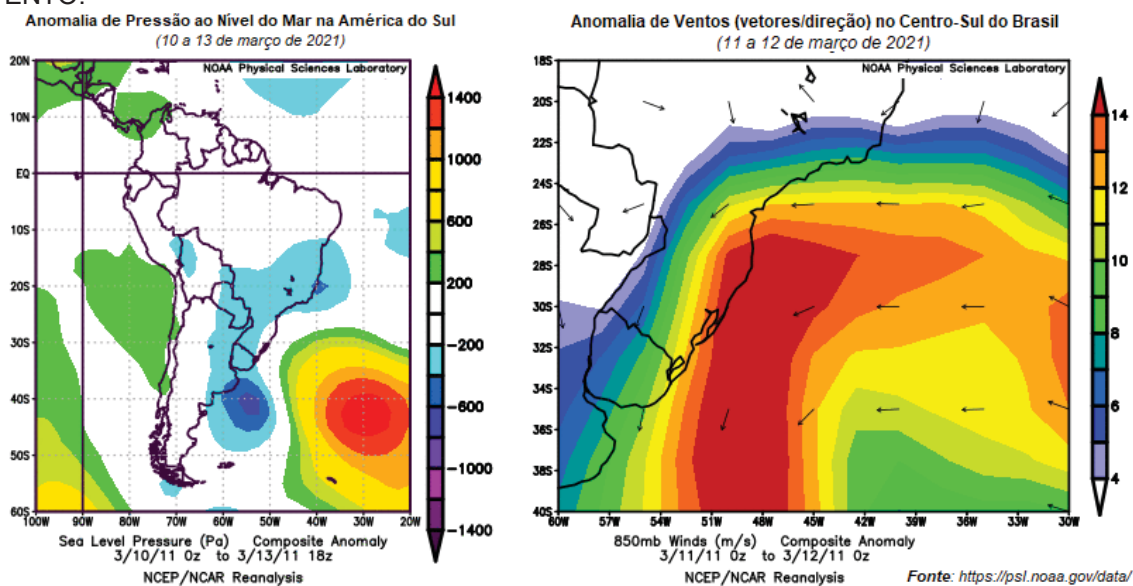
essa configuração e padrão de circulação influenciou a saída de ventos ao norte do anticiclone (sentido anti-horário) em direção ao continente margeando o litoral brasileiro, indo na direção sul e atravessando o litoral paranaense, conforme destacado na imagem à direita da Figura 24.

FIGURA 24 - IMAGEM DE SATÉLITE GOES-12 COLORIDA DA NOITE DO DIA 11 (12/03/2011 – 00z GMT), DESTACANDO A ABRANGÊNCIA DA NEBULOSIDADE MAIS DENSA E AS DUAS ZONAS ANTICICLÔNICAS A OESTE E A LESTE DO CAVADO; EM DESTAQUE, DUAS IMAGENS NO CANAL INFRAVERMELHO REALÇADO EXIBINDO A ENTRADA DO SISTEMA CONVECTIVO NO LITORAL DO PARANÁ.



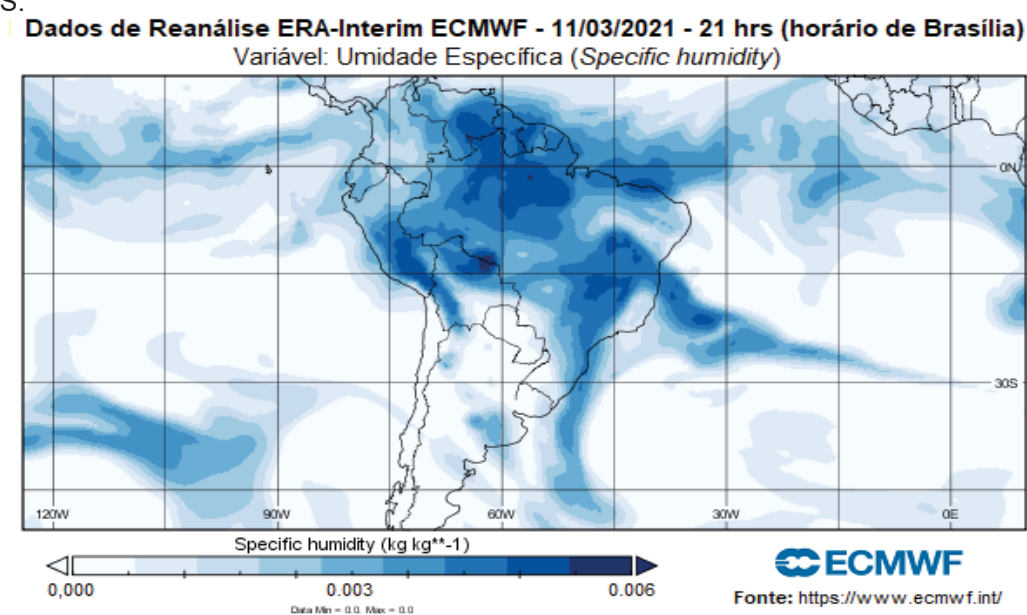
FONTE: CPTEC (2021).

FIGURA 25 – DADOS DE ANOMALIA DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA E VENTOS NO PERÍODO DO EVENTO.



Tal dinâmica sinótica contribuiu para a configuração de um corredor de umidade no dia 11 de março, conforme a Figura 26, que evidencia a variável umidade específica (*specific humidity*) na média troposfera (500 hpa). Nesse aspecto, ressalta-se que um fenômeno bastante semelhante também foi observado nos dados da variável coluna de vapor (*total column water vapor*). Diante deste cenário, ao longo de todo dia 11 a região do litoral paranaense permaneceu com densa nebulosidade e aporte de umidade, o que favoreceu a convecção e a ocorrência do evento extremo de precipitação na região da Serra do Mar.

FIGURA 26 – DADOS DE UMIDADE ESPECÍFICA PARA O DIA 11 DE MARÇO DE 2021 ÀS 21 HORAS.



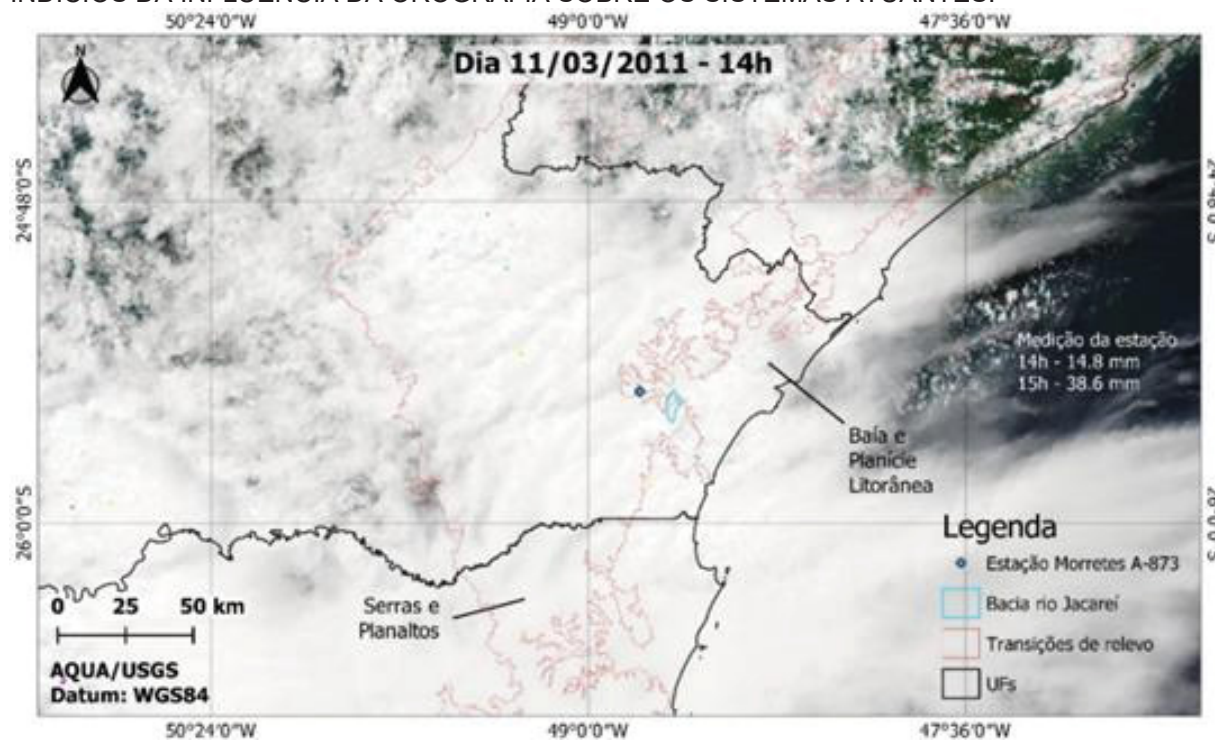
Conforme os boletins meteorológicos da ocasião, emitidos pelo CPTEC, dentre todos os modelos analisados o modelo ETA teve maior acurácia em relação ao fenômeno, indicando a formação de uma zona de pressões abaixo de 1000 hPa no local, o que se confirmou posteriormente (CPTEC, 2021).

As imagens do sensor MODIS/Aqua analisadas permitiram observar a grande extensão da área de instabilidade sobre a região da baía de Paranaguá e imediações, com área de abrangência discrepante em relação ao tamanho da bacia hidrográfica do rio Jacareí (contorno em azul claro na Figura 27).

Nota-se também a diferença de textura em relação a outras áreas nebulosas no entorno, principalmente na transição entre o primeiro e o segundo planalto paranaenses, indicando um possível efeito da orografia sobre a área de abrangência deste sistema.

No entanto, os dados analisados não permitem caracterizar este efeito como determinante para o evento, uma vez que também foram observados acumulados elevados em outros locais e, principalmente, acima de 100 mm na região norte do Paraná ao final do dia 12, como indicam as observações feitas na cidade de Maringá-PR (Tabela 3).

FIGURA 27 - IMAGEM MODIS DO DIA 11/03/2011 – 14 HORAS NO HORÁRIO LOCAL (17Z GMT). INDÍCIOS DA INFLUÊNCIA DA OROGRAFIA SOBRE OS SISTEMAS ATUANTES.



FONTE: A AUTORA (2021) / USGS (2018) E IBGE (2018).

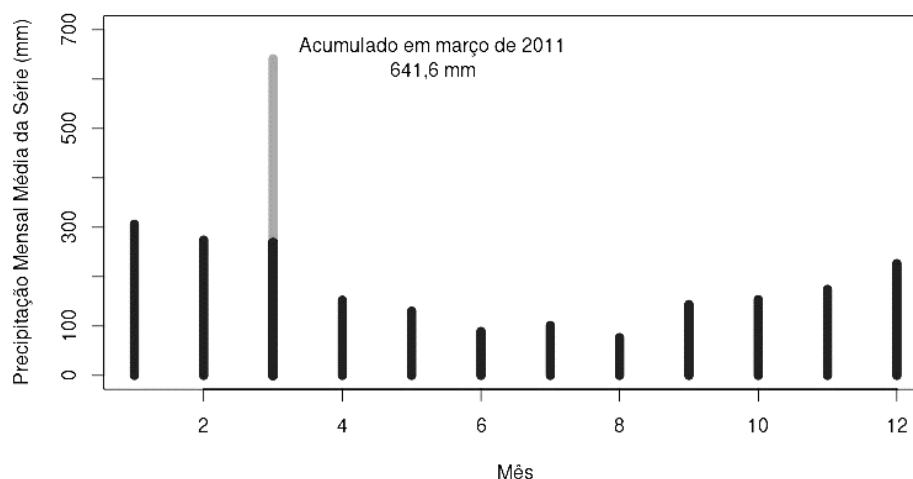
Nesse sentido, as condições atmosféricas observadas sobre a bacia hidrográfica do rio Jacareí propiciaram a formação e o desenvolvimento de sistemas convectivos com a convergência de umidade justamente sobre a região leste do Paraná, incluindo a Serra do Mar e o primeiro planalto. As condições de circulação observadas nas figuras indicam ainda um aporte de umidade do oceano em sentido que favorece a ocorrência de chuvas orográficas.

4.3.2 Magnitude e Duração da Precipitação

Os eventos de março de 2011 se destacaram em meio aos registros históricos e do monitoramento meteorológico do local. A partir da série histórica da Estação Convencional Colônia Santa Cruz, no período desde a instalação até 2018, observa-se que o valor precipitado no mês de março de 2011 (641,6 mm, em destaque) foi

superior ao dobro do registrado em média para este mês nos 37 anos antecedentes (265,24 mm), como observa-se na Figura 28. Conforme a estação convencional Colônia Santa Cruz, entre os dias 10 e 13 de março de 2011 a precipitação acumulada foi de 427,6 mm (AGUASPARANÁ/ANA, 2018). Já a série da Estação Automática Morretes A-873 possibilitou maior detalhamento, conforme observa-se na Figura 29. Os gráficos representam excertos da série para o período entre os dias 8 (terça-feira) e 15 de março (terça-feira), para as variáveis que apresentaram alteração de comportamento na tarde do dia 11 (sexta-feira).

FIGURA 28 - PRECIPITAÇÃO MENSAL MÉDIA NA SÉRIE HISTÓRICA DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL COLÔNIA SANTA CRUZ (06/1974 – 10/2018) EM PRETO, COM DESTAQUE EM CINZA CLARO PARA O VALOR ACUMULADO DO MÊS DE MARÇO DE 2011.



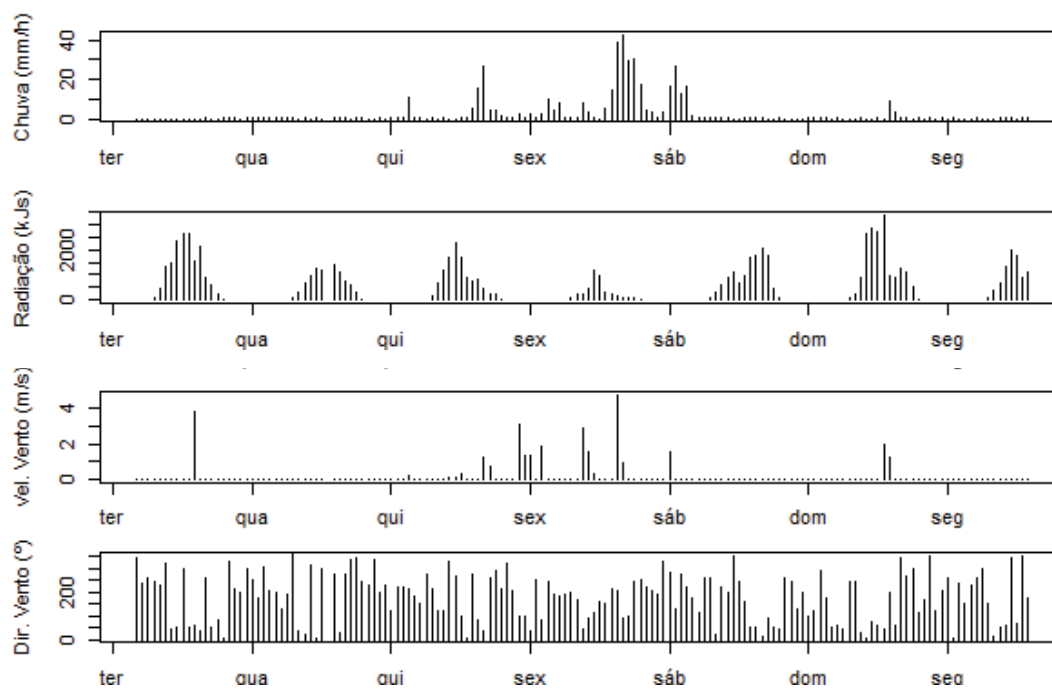
FONTE: A AUTORA (2018) / ANA/AGUASPARANÁ (2018)

A partir da análise das variáveis neste trecho da série, observa-se que, simultaneamente à intensificação do evento pluviométrico por volta das 12 horas da sexta-feira (dia 11), ocorreu também a queda da pressão atmosférica, da temperatura e da incidência de radiação mesmo no período diurno; e o relativo aumento na velocidade dos ventos, que chegaram a 4,8 m/s (17,28 km/h).

Por meio da separação da série em eventos de chuva criou-se um banco de dados com os principais indicadores meteorológicos associados à precipitação. Para cada evento de chuva extraíram-se valores de intervalo (horas), de horas de chuva efetiva, de acumulado (mm), de intensidade média sobre horas de chuva efetiva, de intensidade máxima do período e de estação do ano. Gerados a partir destes dados, os boxplots da Figura 30 evidenciam a distribuição destes eventos na série, conforme as estações do ano para as variáveis “acumulado” (mm), “duração” (h) e “intensidade máxima” (mm/h).

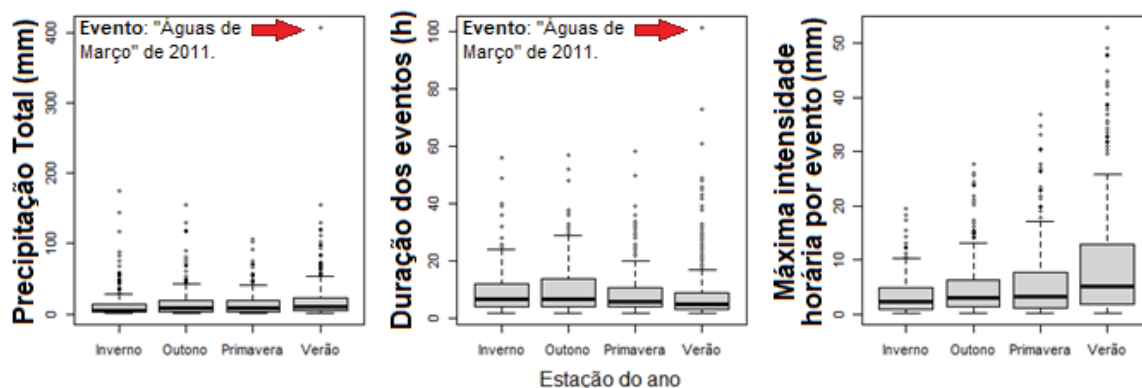
Os boxplots corroboram a tendência observada na região de que chuvas mais intensas ocorrem no verão, período de grandes volumes de chuva registrados em curtos períodos. Observa-se também que maior recorrência de eventos mais duradouros no outono e no inverno.

FIGURA 29 - SÉRIES DE DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MORRETES-A873, CORRESPONDENTES AO PRINCIPAL EVENTO EM ANÁLISE – ENTRE OS DIAS 8 (TERÇA) E 14/03/2011 (SEGUNDA). O DIA 11 DE MARÇO DE 2011 CORRESPONDE À SEXTA-FEIRA.



FONTE: A AUTORA (2018) / INMET (2019).

FIGURA 30 - BOXPLOTS DAS CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS AVALIADAS POR ESTAÇÕES DO ANO, NO CONJUNTO DE DADOS DE EVENTOS GERADO A PARTIR DOS DADOS DA ESTAÇÃO MORRETES-A873. O EVENTO ÁGUAS DE MARÇO ESTÁ DESTACADO EM VERMELHO.



FONTE: A AUTORA (2020) / INMET (2019).

A Tabela 4 expressa o banco de dados de eventos sintetizado a partir dos dados da estação Morretes A-873. Foram identificados na série 1214 eventos de

chuva, desconsiderando-se eventos com duração de apenas uma hora ou acumulado menor que 0,2 mm. Cada linha representa um evento de chuva, e os dados foram ordenados de forma decrescente de acordo com o valor de precipitação acumulada (mm). Exibem-se os 20 eventos de maior valor para esta variável. Estão dispostos na tabela também as temperaturas média, mínima e máxima, a velocidade máxima do vento e a estação do ano em que o evento ocorreu.

TABELA 4 - PRINCIPAIS EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS NA SÉRIE DA ESTAÇÃO MORRETES – A873.

N	Início	Término	Acum, (mm)	H	HC	Imed (mm/h)	Imax (mm/h)	Tmed (°C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Vel, Vento max (m/s)	Estação
1	08/03/2011 16:00	14/03/2011 14:00	406,4	14 3	10 1	4,02	42,6	23,28	20,2	30,7	4,8	Verão
2	20/06/2013 04:00	21/06/2013 22:00	175,8	43	40	4,40	19,4	17,33	16,4	19,1	3,5	Inverno
3	13/02/2015 17:00	16/02/2015 07:00	156,0	63	45	3,47	52,8	22,03	19,9	27,9	3,4	Verão
4	04/06/2012 06:00	07/06/2012 11:00	155,6	78	52	2,99	14,8	15,62	13,4	18,5	3,4	Outono
5	30/07/2011 04:00	02/08/2011 01:00	143,8	70	56	2,57	7,4	16,33	15	21,1	2,8	Inverno
6	22/04/2010 18:00	24/04/2010 04:00	129,2	35	30	4,31	26	19,96	18,2	23	2	Outono
7	25/04/2012 21:00	26/04/2012 22:00	129,0	26	21	6,14	24	18,38	17,5	19,6	1,7	Outono
8	16/01/2017 19:00	17/01/2017 17:00	129,0	23	15	8,60	43	24,58	22,8	29,1	2,7	Verão
9	15/02/2019 11:00	17/02/2019 17:00	120,6	55	38	3,17	13,8	21,19	18,5	28,4	3	Verão
10	03/03/2010 21:00	06/03/2010 22:00	119,0	74	48	2,48	9,2	22,27	18,8	28,2	3,9	Verão
11	30/05/2019 03:00	31/05/2019 17:00	119,0	39	31	3,84	23,8	19,65	18,6	22,3	2,2	Outono
12	20/07/2013 08:00	23/07/2013 10:00	117,6	75	56	2,10	12,2	14,08	7,1	19,9	3,9	Inverno
13	18/05/2017 04:00	20/05/2017 19:00	116,8	64	57	2,05	9	19,29	17,8	21,4	4	Outono
14	01/01/2014 18:00	02/01/2014 01:00	110,8	8	8	13,85	47,8	23,74	23,3	30,3	3,2	Verão
15	13/12/2010 06:00	14/12/2010 23:00	106,4	42	36	2,96	16,6	17,11	13,9	22,3	6,2	Primav era
16	11/11/2008 05:00	12/11/2008 14:00	103,0	34	25	4,12	30,2	20,15	18,1	23,5	2,5	Primav era
17	23/02/2012 13:00	25/02/2012 09:00	102,8	45	33	3,12	17,2	23,95	21,4	31,8	1,8	Verão
18	18/01/2011 18:00	20/01/2011 01:00	99,6	32	19	5,24	38,8	23,41	21,7	27,3	2,3	Verão
19	23/12/2017 15:00	25/12/2017 13:00	98,6	47	27	3,65	16	24,28	20,5	30,7	4,4	Verão
20	20/01/2010 16:00	23/01/2010 23:00	97,2	80	42	2,31	33,6	23,03	20,9	32,2	3,7	Verão

Em que: N é a referência do registro; Início é a primeira hora com precipitação acima de 0,2 mm após um intervalo de 6 horas; Término é a última hora com precipitação acima de 0,2 mm antes do próximo intervalo de 6 horas sem chuva; H é a duração total do evento; HC é a soma dos períodos do evento em que efetivamente choveu; Imed é a intensidade média do evento (mm/h); Imax é a máxima intensidade horária registrada durante o evento; Tmed, Tmin e Tmax são respectivamente as temperaturas médias, mínima e máxima registradas durante o evento; Vel. Vento Max. é a máxima velocidade do vento registrada durante o evento.

FONTE: A AUTORA (2020) / INMET (2019).

Observa-se na Tabela 4 que dois eventos ocorridos no verão de 2011 figuram entre os mais severos desta série, com destaque para o primeiro, indicado pelo código

1 e diretamente associado aos movimentos gravitacionais de massa ocorridos na bacia do rio Jacareí. Conforme identificado, este evento ocorreu entre as 6 horas do dia 08/03/2011 e as 14 horas do dia 14/03/2011. A análise deste conjunto de eventos indica que este foi o episódio de maior acumulado da série com 406,40 mm registrados em um intervalo de 143 horas, com 101 horas de chuva efetiva (com registros superiores a 0,2 mm). Há ainda outro evento identificado como possivelmente relacionado aos desastres associados ao episódio ocorrido no mês de janeiro, correspondente ao registro de código 18.

A Figura 31 dispõe das curvas de permanência que permitem a visualização das características do evento frente ao observado na série usualmente. A

Tabela 5 evidencia a excepcionalidade do evento pluviométrico associado ao

	Acumulado (mm)	Intensidade max (mm/h)	Temperatura do Ar (°C)	Velocidade do Vento (km/h)	Duração (h)
Média	16,59	0,22	20,61	8,21	15,22
Valor Máximo	406,6	53,80	31,4	48,96	143
Valor no Águas de Março	406,6	42,6	23,3	17,28	143
Percentil 99%	4	8,60	27,39	25,56	60
Mais Frequente (valor e frequência)	1,2 = 43	0.6 = 73	23 = 6	0 = 109	2 e 5 = 77

FONTE: A AUTORA (2020).

Águas de Março que superou o observado em 99% dos outros eventos da série para as variáveis chuva acumulada, intensidade máxima e duração.

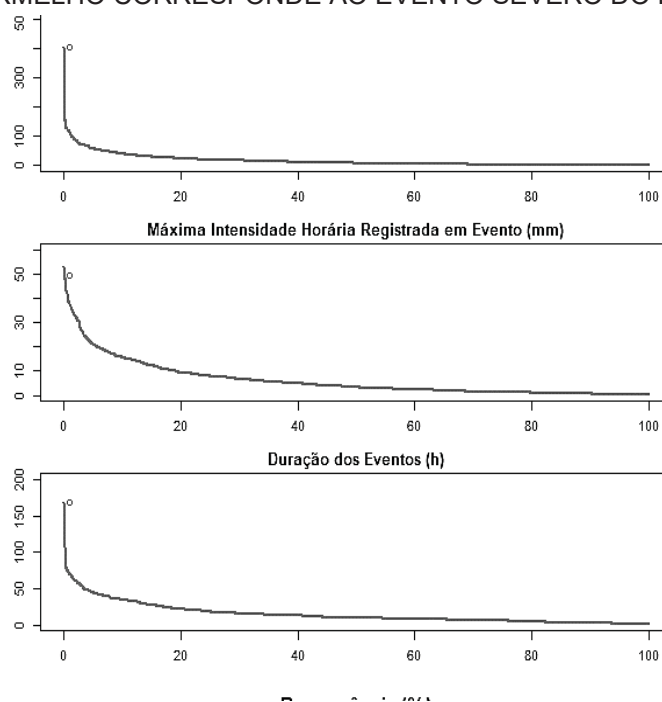
Entretanto, com relação às intensidades máximas registradas foi identificado que o evento mais intenso ocorreu no ano de 2015, com 52,8 mm registrados em uma hora. O evento de 2011 é o segundo evento mais severo neste quesito, com um máximo de intensidade registrada de 42,6 mm de chuva em uma hora. A Figura 31 corrobora este aspecto por evidenciar que a precipitação total acumulada do evento e a duração observadas durante o Águas de Março são mais atípicas em relação à série do que a intensidade observada.

TABELA 5 - FREQUÊNCIAS DE CARACTERÍSTICAS DE EVENTOS E COMPARAÇÃO COM O EVENTO ÁGUAS DE MARÇO.

	Acumulado (mm)	Intensidade max (mm/h)	Temperatura do Ar (°C)	Velocidade do Vento (km/h)	Duração (h)
Média	16,59	0,22	20,61	8,21	15,22
Valor Máximo	406,6	53,80	31,4	48,96	143
Valor no Águas de Março	406,6	42,6	23,3	17,28	143
Percentil 99%	4	8,60	27,39	25,56	60
Mais Frequente (valor e frequência)	1,2 = 43	0.6 = 73	23 = 6	0 = 109	2 e 5 = 77

FONTA: A AUTORA (2020).

FIGURA 31 - PERMANÊNCIA DOS VALORES DE ACUMULADO PLUVIOMÉTRICO, MÁXIMA INTENSIDADE HORÁRIA E DURAÇÃO DE EVENTOS AGRUPADOS AO LONGO DA SÉRIE. O DESTAQUE EM VERMELHO CORRESPONDE AO EVENTO SEVERO DO DIA 11/03/2011.



FONTA: A AUTORA (2020).

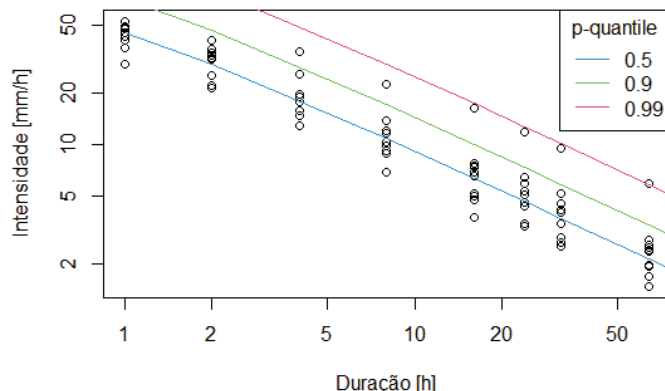
Em relação às curvas IDF, o ajuste dos parâmetros obtido por meio de verossimilhança pode ser verificado na Tabela 6, e a representação gráfica observa-se na FIGURA 32, para os quantis 50%, 90% e 99%, que representam respectivamente os períodos de retorno de 2, 10 e 100 anos.

TABELA 6 – VALOR DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO GEV AJUSTADOS AO CONJUNTO DE DADOS DA ESTAÇÃO MORRETES A873 POR MEIO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA.

μ	σ	θ	ϵ	ϵ^2	τ
3,946219	13,79698	0,2132681	0,4353029	0,7978451	0

FONTA: A AUTORA (2020).

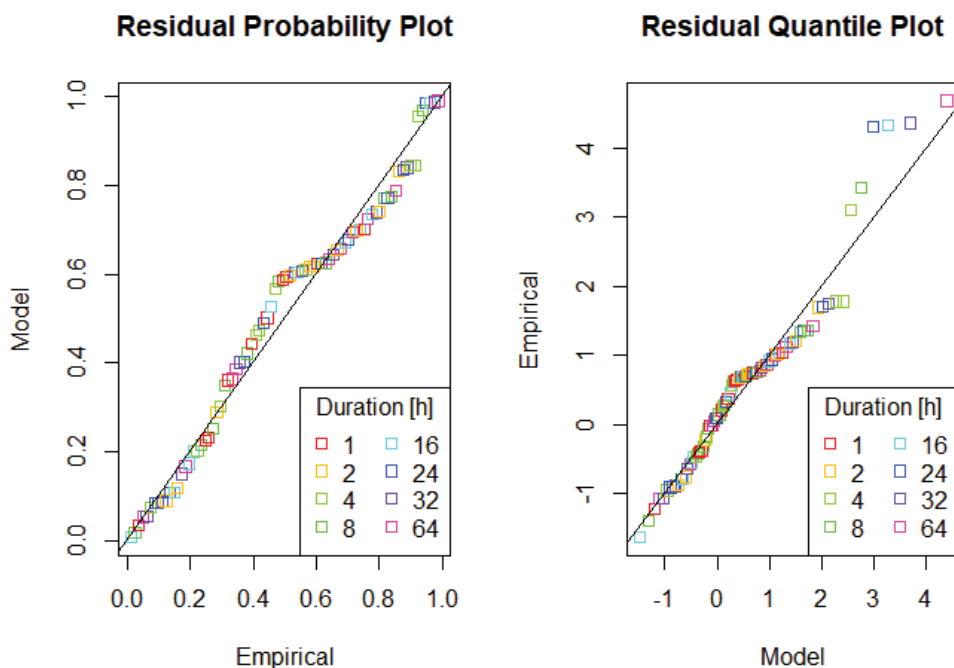
FIGURA 32 – CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA GERADAS POR APLICAÇÃO DA GEV COM DEPENDÊNCIA DA DURAÇÃO DOS EVENTOS PARA OS PERÍODOS DE RETORNO DE 2, 10 E 100 ANOS.



FONTE: A AUTORA (2020).

A adequação desta aplicação foi verificada por meio da plotagem dos resíduos, revelando-se pertinente, porém imbricada de maior incerteza para precipitações de duração mais longas conforme Figura 33.

FIGURA 33 - CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA GERADAS POR APLICAÇÃO DA GEV COM DEPENDÊNCIA DA DURAÇÃO DOS EVENTOS.



FONTE: A AUTORA (2020).

Conforme a função ajustada, o período de retorno da precipitação ocorrida durante o episódio das Águas de Março foi de 80 anos em relação à intensidade média para a duração de 143 horas, tal como definido pela separação de eventos estabelecida anteriormente neste trabalho. A intensidade média do evento foi de 2.84 mm/h.

O tempo de retorno para a maior intensidade observada durante o evento, conforme a duração de uma hora, é de 2.86 anos, refletindo esta relativa alta recorrência de precipitações de alta intensidade na região.

4.4 CONCLUSÕES

A análise das cartas sinóticas, de imagens oriundas de sensoriamento remoto e dos produtos de reanálise climática evidencia que a região litorânea do Estado do Paraná é propícia para a convergência de aportes de umidade associados a fatores distintos de circulação atmosférica. No mês de março de 2011 participaram desta convergência sistemas diferentes, todos com grande potencial de aporte de umidade, culminando na persistência da precipitação por várias horas na região da Serra do Mar paranaense. Dentre as origens da precipitação na ocasião do evento destacam-se: a atuação de um cavado sobre a região sul; e a geração de nebulosidade na região a leste dos Andes e o trânsito dessa massa úmida de oeste para sul/leste, onde costuma resultar em instabilidade atmosférica em altos níveis com chuvas intensas e prolongadas. Simultaneamente, ocorreram aportes de leste de umidade oriunda da região do Oceano Atlântico para a região continental, em diversos níveis. Houve ainda, de forma secundária, aporte de umidade deslocada de sistemas atmosféricos próximos à região de atuação da ZCAS. Foram identificados ainda indícios do efeito da orografia sobre os sistemas atuantes, possivelmente contribuindo para a permanência deles sobre o local. A influência do relevo da Serra do Mar sobre a incidência de chuvas intensas na região demanda ainda estudos específicos e aprofundados.

O tratamento dos dados da estação meteorológica Morretes permitiu a singularização de todos os eventos pluviométricos registrados pela estação, com destaque para os que tiveram interferência sobre os fenômenos avaliados, e para os eventos extremos identificados no período de maior interesse (de 8 a 14 de março de 2011). A separação em eventos viabilizou a medida da excepcionalidade do evento ocorrido diante dos dados, que mostraram que os eventos de 2011 foram até duas vezes mais severos do que os eventos mais duradouros e de maior acumulado pluviométrico observados no restante da série. Isto implicou em respostas hidrogeomorfológicas igualmente extremas diante do cenário de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa existente. Nos três quesitos, intensidade,

duração e acumulado, a precipitação ocorrida no evento Águas de Março foi superior às observações dos percentis 99%. Entretanto, os máximos de intensidade horária registrados durante o evento são menos raros do que a duração total e o acumulado observados, indicando que o caráter de excepcionalidade do evento Águas de Março reside mais sobre a sua extensa duração e acumulado do que sobre as intensidades horárias registradas.

A resolução horária dos dados analisados também permitiu identificar possíveis situações de saturação do solo na bacia poucos dias antes do evento principal (dia 11), na transição entre os dias 6 e 8 de março. Este cenário de saturação de solo seguido de novo aporte pluviométrico em grande intensidade e curto período é bastante favorável à liquefação dos solos e provavelmente está associado à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa. Estas observações reforçam a importância da umidade antecedente para a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa deflagrados pela chuva, especialmente na região da bacia hidrográfica do rio Jacareí. Pesquisas complementares acerca das características pedológicas e geomorfológicas do local são necessárias para aprofundar a análise da umidade antecedente e da contribuição da intensidade da chuva e de sua variação horária à luz de aspectos como a coesão, a condutividade hidráulica e a tensão de cisalhamento impostas nesse contexto.

Portanto, por meio deste estudo conclui-se que, sobretudo nas áreas mais suscetíveis à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa da Serra do Mar, é necessário dar especial atenção à observação de dois aspectos no monitoramento de eventos extremos. O primeiro deles é a coincidência de atuação de sistemas atmosféricos distintos e de grande potencial de transporte de umidade sobre uma mesma região; e o segundo é a tendência de movimento desses sistemas, devendo ser considerada alarmante a persistência deles sobre um mesmo local.

Além disso, o relativamente baixo período de retorno da intensidade média da precipitação durante o evento destaca que a probabilidade de recorrência de eventos intensos é maior, o que deve ser sempre avaliado juntamente da umidade antecedente. Cabe realizar maiores levantamentos acerca de novas áreas suscetíveis e com espessura de solo passível de gerar movimentos gravitacionais de massa de mais alto impacto; promover o ordenamento territorial na bacia

considerando estas questões; e desenvolver atividades que promovam a preparação da comunidade em casos de desastres.

5. LIMITAÇÃO E MANEJO DE DADOS DE RELEVO E VEGETAÇÃO PARA VIABILIZAÇÃO DO CÁLCULO DE VOLUMES MOVIMENTADOS EM FLUXOS DE DETRITOS NA BACIA DO RIO JACAREÍ - PR

5.1 INTRODUÇÃO

O estudo de fenômenos e processos hidrogeomorfológicos dependem de extenso levantamento de dados e isto também é válido para os fluxos de detritos. Tanto a análise da composição da massa quanto da dissipação de energia no decorrer do fenômeno ou de sua velocidade demandam observações e medições complexas. Como consequência, o estudo dos fluxos de detritos implica no uso e na coleta de dados de obtenção cara e dificultosa, como mostram as tentativas de monitoramento e observação (HURLIMANN *et al.*, 2019) ou de experimentos controlados especialmente no Japão, na Itália e nos Estados Unidos da América (IVERSON, 1997; NAGL *et al.*, 2020). A Figura 34 traz um exemplo de instalação de experimento de estudo de fluxos de detritos do USGS, no ano de 1992 (IVERSON, 1997).

FIGURA 34 – EXPERIMENTOS DE ESTUDOS DOS FLUXOS DE DETRITOS REALIZADOS PELO USGS.



FONTE: IVERSON (1997).

A modelagem busca viabilizar uma forma de representação de fenômenos complexos, por meio da implementação de equações que expressam processos físicos, fazendo-se importante para a pesquisa e para a gestão territorial. Segundo Takahashi (2007), um modelo pode ser pertinente para o estudo dos fluxos de detritos

no que tange ao “macrocomportamento”, ou seja, às características gerais dos movimentos como a profundidade, a velocidade e o alcance do fluxo.

O transporte e a deposição são os maiores sinalizadores do impacto dos fluxos de detritos para as paisagens e para a sociedade. Por isso, constituem os objetos centrais da modelagem deste fenômeno nas últimas décadas. Uma forma comum de tentativa de representação do transporte de fluxos envolve a equação da continuidade, por meio da qual assume-se a conservação das massas durante o deslocamento. Diante da associação entre as propriedades físicas dos fluidos e as características geomorfológicas e dos materiais, a maioria dos modelos computacionais contemporâneos voltados à análise de MGMs utiliza como dado principal os modelos digitais de terreno (MDTs), dos quais se derivam diversos atributos topográficos e geomorfométricos (RICHITT *et al.*, 2017). Estes atributos caracterizam a vertente e condicionam o movimento do fluxo em virtude da força da gravidade associada às declividades, à curvatura e outros parâmetros (DIAS E VIEIRA, 2022; LISTO E NERY, 2022 E LIMA *et al.*, 2020). Além disso, os MDTs podem fornecer indiretamente — junto a dados de espessura do solo — a cubagem do material mobilizado/disponível. Diante da importância desse recurso, muitos modelos atuais têm levantamentos de terreno/MDTs como dados de entrada.

A modelagem de fluxos de detritos necessita de boa resolução e fidelidade às condições do terreno anteriores aos fluxos. Isto ocorre porque a estimativa do volume movimentado está relacionada à profundidade do solo, em geral manejada na modelagem de fluxo de detritos por meio de um modelo digital de terreno (MDT). A qualidade e a resolução deste MDT é, portanto, determinante para a simulação do fenômeno tanto na área de escavação quanto na área de deposição, pois influencia nos resultados de volume movimentado, alcance e deposição obtidos durante os experimentos.

Em geral, no Brasil, os locais onde ocorrem fluxos de detritos são ambientes montanhosos e florestados com destaque para a Serra do Mar, conforme levantamento de Kobiyama e Michel (2014; 2015). Esta unidade de relevo dispõe de afloramentos rochosos e encostas declivosas com perfis de grande amplitude topográfica em curtas distâncias. A proximidade do Oceano Atlântico e a própria orografia impõem um regime intenso de pluviosidade, que está associado ao desenvolvimento da paisagem característica da Mata Atlântica no local. A isto está

associada a espessura de solo observada em geral na região (2-3 m) (DE PLOEY E CRUZ, 1979) e a cobertura de Floresta Ombrófila Densa, conforme descrito no capítulo 2. A vegetação influencia os MGMs na região de diversas formas, com destaque para aquelas relacionadas à gênese dos escorregamentos; e aquelas relacionadas aos restos vegetais como detritos lenhosos transportados pelos fluxos ou influenciando a trajetória deles. A primeira consiste na contribuição positiva ou negativa para a estabilidade das encostas, respectivamente a partir da coesão das raízes e do peso da vegetação. E a segunda está mais associada à dinâmica dos fluxos por meio dos possíveis barramentos causados pelos detritos lenhosos ao longo dos canais fluviais. Dessa forma, no caso da modelagem de fluxos de detritos e do estudo do alcance/volume mobilizado, ganham importância também a vegetação e os detritos lenhosos presentes em meio aos detritos rochosos e ao solo transportado.

Um dos aspectos mais característicos dos fluxos de detritos é a capacidade que este fenômeno possui de mobilizar tanto material fino, como grandes blocos e matacões. O material mobilizado por fluxos de detritos nas diferentes regiões da Serra do Mar é de tamanho e granulometria variada, sendo que alguns blocos podem chegar a superar os 2,5 m de diâmetro. Ao contrário do que ocorre com o mapeamento de suscetibilidade, em que a resolução dos MDTs pode não ser determinante (MARTINS *et al.*, 2020), no caso de modelagem de escorregamentos e de fluxo/propagação, a espessura do solo e o diâmetro dos blocos parecem limitar a resolução do dado passível de uso na representação do fenômeno na região (FRANCK *et al.*, 2021). Em outras palavras, não são muito fidedignas as simulações deste fenômeno realizadas com dados de resolução que não permitam discretizar e detalhar as formas prévias e resultantes. No caso dos MGMs na Serra do Mar, portanto, a resolução mínima para representação adequada das feições de interesse é de 2,5 metros, sendo ideal que seja superior a isso.

Diante desta relação entre solo, rocha e vegetação nos fluxos de detritos, um dos grandes desafios impostos à modelagem é a disponibilidade de dados. Especialmente em locais menos desenvolvidos e pela baixa recorrência do fenômeno, o investimento no levantamento de dados nas áreas afetadas é feito como remediação e não como prevenção. Dessa forma, estes levantamentos são em geral realizados após a ocorrência dos fluxos.

No caso da bacia hidrográfica do rio Jacareí, local afetado pelo evento “Águas de Março” em 2011, há uma relativa boa disponibilidade de dados quando comparado a muitos outros locais da Serra do Mar. Entretanto, os dados de melhor detalhamento são produtos de levantamentos posteriores à ocorrência de MGMs, conforme elucidada a Figura 35 adiante. Mais detalhes sobre estes dados são trazidos na seção 5.2.

FIGURA 35 – DISPONIBILIDADE DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO E RESOLUÇÃO



FONTE: A AUTORA (2022).

A simulação de eventos passados vem sendo realizada em outros trabalhos que utilizam simulação de MGMs não apenas como meio de calibração de modelos, mas como forma de estudar a dinâmica e o comportamento de eventos como os fluxos de detritos, tal qual indicam os trabalhos de Nakatani et al. (2014) e Ouyang et al. (2018). Entretanto, para simular o passado são necessários dados prévios às ocorrências de MGMs e em boa resolução, conforme destacado por Nakatani et al (2016). No contexto brasileiro, uma solução para problemas dessa natureza também foi buscada por Vilella e Kobiyama (2019) e é recorrente no cotidiano de profissionais e estudantes que lidam com a modelagem e o monitoramento de MGMs.

Neste estudo buscou-se uma solução para a lacuna de disponibilidade de dados de boa resolução pré-fluxos de detritos, a partir da remodelagem do MDT utilizado e da estimativa de geração de detritos lenhosos durante o evento. Isso trouxe desafios tanto em relação ao MDT quanto aos levantamentos acerca da vegetação, que

possuíam dados já alterados nos locais onde ocorreram os escorregamentos, o transporte e a deposição do material. Após a adaptação dos modelos às condições pretéritas da bacia, é objetivo também deste estudo calcular os volumes movimentados durante o evento “Águas de Março”.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a resolução de cada um dos problemas observados em relação à limitação de dados para a modelagem de fluxo de detritos na bacia hidrográfica do rio Jacareí, foram adotadas alternativas distintas. No Quadro 3 estão resumidos os desafios e soluções encontrados, que são detalhados a seguir. Os métodos empregados dividem-se em: estimativa de volume e área de vegetação mobilizada e preparação dos MDTs na região de interesse.

Diante do alto custo computacional do processamento de dados matriciais, buscou-se ao máximo utilizar soluções menos custosas sob este aspecto, pelo que se recorreu ao manejo dos dados por meio de scripts em linguagem R. Quando menos custoso, o processamento de dados espaciais foi feito por meio do software QGIS versão 3.16 Hannover.

5.2.1 Preparação e remodelagem do MDT para a execução de experimentos de modelagem de fluxo de detritos com Hyper Kanako

Conforme exibido na Figura 35, há dois MDTs disponíveis para a bacia hidrográfica do rio Jacareí como um todo. O primeiro foi criado com base em dados levantados em 1998 e, portanto, anteriores ao evento de 2011, e consiste em um modelo gerado por meio de interpolação realizada pelo AGUASPARANÁ (2013). Estes dados pretéritos são pontos e curvas de nível oriundos das cartas do IBGE (escala 1:25000, 1998). O resultado é um MDT composto por pixels de resolução 20 metros, cada qual com seu valor de hipsometria, doravante denominado MDT AGUASPARANÁ. O segundo, da época pós-evento, é um modelo obtido a partir de aerolevanteamento com radar pela empresa BRADAR (MINEROPAR, 2015) que possui pixels de resolução de 2,5 metros e será referenciado adiante como MDT MINEROPAR. Apesar da resolução adequada para realização da modelagem, não seria fidedigno utilizar o MDT de melhor resolução na modelagem neste caso, uma vez que este já possui as cicatrizes dos movimentos gravitacionais de massa ocorridos em 2011.

QUADRO 3 - QUADRO GERAL DE MÉTODOS EMPREGADOS NESTE CAPÍTULO.

PROBLEMA	DADOS/RECURSOS	MÉTODO	FERRAMENTAS
Adequar o MDT de melhor resolução às condições pretéritas da bacia	- MDT res. 2.5 m (MINEROPAR/IAT, 2015) - MDT res. 20m (ÁGUASPR/IAT, 2013)	Modelos aditivos generalizados para criação um MDT de resolução 2.5 com base nas características pretéritas do relevo	R - pacote MGCV; R - pacote RSAGA
Estimar volume escorregado desde as cicatrizes	- MDT res. 2.5 m (MINEROPAR/IAT, 2015) - MDT res. 20m (ÁGUASPR/IAT, 2013) reamostrado	Reamostragem e subtração entre rasters (matricial) Ferramenta de estimativa de volume de superfícies	QGIS
Estimar a altura da vegetação das áreas escorregadas	- Polígonos de altura de vegetação (BRADAR - MINEROPAR/IAT 2015); - Cicatrizes delimitadas por MINEROPAR/GEOPLANEJAMENTO (2015)	Atribuição de características de altura de vegetação do entorno imediato ao interior da cicatriz por meio de análise espacial/geoprocessamento	QGIS - Buffers e outras operações vetoriais
Estimar o volume dos detritos lenhosos	Levantamentos de campo em bibliografia (SCHEER et al., 2011) - Indivíduos/Ha e DAP médio (OLIVEIRA et al., 2018)	Modelo volumétrico empírico da Floresta Ombrófila Densa (OLIVEIRA et al., 2018) para obtenção de volume por indivíduo, por meio de DAP e altura	QGIS

Para contornar este problema foram testados diversos métodos, com destaque para dois que geraram resultados melhores. O primeiro envolveu o preenchimento das cicatrizes no MDT MINEROPAR com base em espessuras estimadas por estudo anterior (LOPES, 2018). E o segundo implicou na criação de um modelo baseado no ajuste de um modelo aditivo generalizado que estabelece uma relação entre os valores de hipsometria de cada pixel no MDT MINEROPAR e estes valores para os mesmos pontos no MDT AGUASPARANÁ (mais antigo) na parte externa às cicatrizes. O primeiro método revelou bons resultados, porém resolve apenas o problema do preenchimento das cicatrizes, não suprimindo informações sobre o estado anterior da porção deposicional da bacia durante o evento. Outro aspecto relevante é que as transformações no terreno que ocorreram entre um levantamento e outro (2011-2015) não são homogêneas por toda a área de estudo e não permitem que seja estabelecida uma relação linear entre o MDT AGUASPARANÁ (pretérito) e o MDT MINEROPAR (mais recente). Diante destes dois fatores, apesar de a primeira opção ter se revelado viável do ponto de vista da execução, recorreu-se ao segundo como solução.

Os modelos aditivos generalizados (HASTIE E TIBSHIRANI, 1990) vem sendo utilizados como alternativa para solução de problemas não lineares e complexos, que além disso costumam demandar grande capacidade computacional (WOOD, 2020). Esses modelos utilizam a suavização como forma de evitar o sobreajuste, penalizando os parâmetros que contribuem mais para o detalhamento do dado modelado em detrimento de sua generalização. Como variáveis também podem ser utilizadas coordenadas geográficas, o que permite levar em conta na modelagem o aspecto de variação espacial. Neste caso valores mais próximos possuem maior tendência de serem semelhantes do que valores mais distantes.

Uma das principais vantagens deste método em relação a modelos geoestatísticos populares como a *krigagem* é a rapidez e o custo computacional muito inferior, que viabiliza o processamento de grandes conjuntos de dados. Em virtude dos fatores citados escolheu-se a função GAM do pacote MGCV (R) para construção desse modelo aditivo generalizado, ajustado aos dados por meio de máxima verossimilhança. O MDT MINEROPAR recortado para a área de estudo possuía mais de 8 milhões de pixels. Visando a redução do custo computacional foi utilizada uma amostra de um milhão de pixels distribuídos aleatoriamente nas áreas dos MDTs,

para os quais foram extraídos os valores de hipsometria correspondentes para o MDT AGUASPARANÁ e para o MDT MINEROPAR. Sobre este conjunto de dados foram ajustados os parâmetros para estabelecimento da relação entre o terreno antigo e o mais recente de melhor resolução. A forma geral do modelo aditivo generalizado ajustado está expressa na Equação 7 abaixo:

$$\text{MDT AGUASPARANA} \sim s(\text{MDT MINEROPAR}) + (\text{LAT}, \text{LONG}) \quad (7)$$

Em que:

MDT AGUASPARANÁ é o MDT gerado por interpolação a partir dos levantamentos topográficos disponíveis em cartas do IBGE;

$s(\text{MDT MINEROPAR})$ é MDT gerado por aerolevanteamento pela MINEROPAR em 2015, suavizado;

LAT são os dados de latitude para cada ponto;

LONG são os dados de longitude para cada ponto

Destaca-se que a princípio foram utilizados mais parâmetros topográficos como covariáveis. Após testes com variáveis como curvatura, plano e declividade o modelo mais representativo da relação entre o MDT AGUASPARANÁ e o MDT MINEROPAR provou-se ser aquele ajustado apenas sobre a variável hipsometria e a componente espacial, o que foi constatado visualmente a partir da comparação entre as rugosidades dos MDTs resultantes e de perfis topográficos. Uma vez construído o modelo, foram obtidos os parâmetros necessários para “forçar” o MDT da MINEROPAR (2015) a adotar as características pretéritas do terreno sem perda de resolução. Isto foi realizado por meio de ferramentas do pacote R-SAGA que permitem aplicação de modelos estatísticos a conjuntos de grids tendo-os como covariáveis do modelo.

5.2.2 Cálculo de volume movimentado durante o evento a partir das cicatrizes

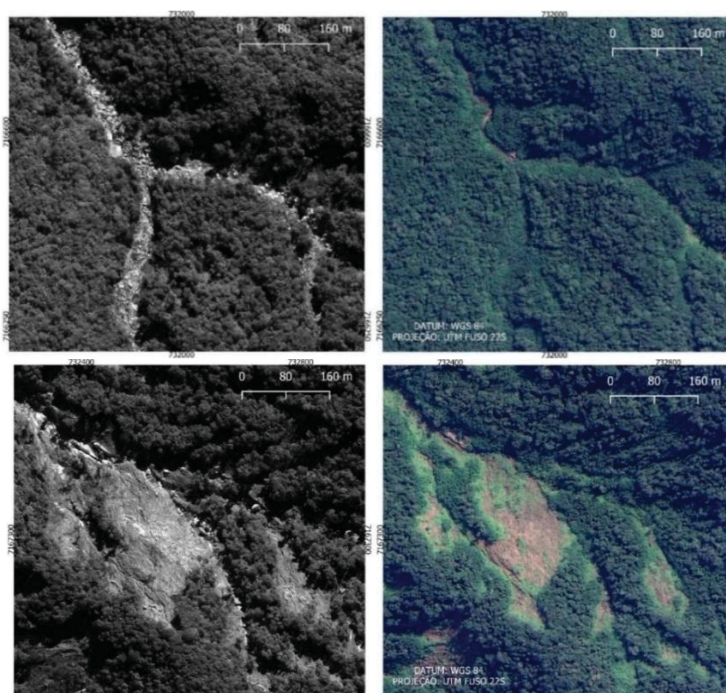
Realizou-se o cálculo do volume de material escorregado das encostas na bacia do rio Gigante, para cada uma das áreas de simulação, por meio de processamento digital de imagens com o software QGIS sobre os MDTs disponíveis. Uma vez realizada a modelagem para simulação das condições pretéritas da bacia e com a obtenção do MDT REMODELADO, em operação matricial subtraiu-se dele o

MDT MINEROPAR original com as cicatrizes, obtendo-se assim a diferença de espessura entre o modelo pretérito, representado pelo MDT REMODELADO e o MDT MINEROPAR (2015) que representa as condições do terreno após 2011. Este resultado foi submetido a um recorte delimitado pelas áreas das cicatrizes e dividido nas 3 subáreas de interesse descritas no capítulo de área de estudo. O volume deste recorte foi mensurado por meio de ferramentas do mesmo software, e é denominado adiante neste estudo como “volume observado” (*Vobs*).

5.2.3 Estimativas de altura e volume de vegetação/detritos lenhosos

Na sequência, foram consideradas as alturas de vegetação obtidas por meio de levantamento radarimétrico BRADAR contratado pela MINEROPAR (hoje IAT) em 2015, mesmo levantamento que originou o MDT de resolução 2,5 metros utilizado neste estudo. Como observado nas imagens do capítulo 2, grande volume de detritos lenhosos foi mobilizado na bacia hidrográfica do rio Jacareí durante o Águas de Março, como apresenta também a Figura 36, onde se pode verificar a regeneração da floresta sobre áreas afetadas por MGMs em 2011. Até o momento desta análise, destaca-se o trabalho produzido por De Lima Frick (2019) acerca de vegetação e sensoriamento remoto na região. Entretanto, ainda não foi realizada especificamente a mensuração do volume de detritos lenhosos gerado durante o evento.

FIGURA 36 - IMAGEM WORLDVIEW PÓS-EVENTO (MAIO DE 2011) E PRESENTE (2021).



FONTE: A AUTORA (2021).

Buscando suprir esta lacuna e verificar a relevância de se considerar a vegetação na modelagem do fluxo para este caso, realizou-se a estimativa dos volumes de detritos lenhosos gerados durante o Águas de Março. Diante do fato de que o levantamento é posterior aos escorregamentos, buscou-se referências de altura de vegetação no entorno das cicatrizes. O valor médio das alturas identificadas nesta faixa de 20 metros foi atribuído como altura da parte interna delas.

Uma vez obtidas as áreas cobertas anteriormente por vegetação e estimada a altura da vegetação que as cobria, foram utilizados parâmetros florestais obtidos na área de estudo na equação volumétrica. Foi utilizada a densidade de indivíduos por hectare (ln/Ha) de 4779 conforme Scheer et al. (2011) a partir do que se calculou a quantidade de indivíduos para cada área de cicatrizes. O *DAP* utilizado foi o *DAP* médio de 21,2 cm identificado em amostra de Floresta Ombrófila Densa conforme Oliveira et al. (2018) em região de paisagem similar à área de estudo.

A partir disso utilizou-se uma equação de estimativa de volume/biomassa aérea de vegetação elaborada empiricamente a partir de amostras coletadas pelo Instituto Florestal de Santa Catarina, para vegetação ombrófila densa (OLIVEIRA et al., 2018) em área de serras contíguas a planícies, tal como a área de estudo. Dispõe-se abaixo da equação utilizada.

$$Vdl = \exp(-10,1201 + 2,2740 * \ln(DAP) + 0,7434 * \ln(H)) * 1,018 \quad (18)$$

Em que:

Vdl – volume de detritos lenhosos (m³);

exp – função exponencial;

ln – logaritmo natural;

DAP (cm) é o diâmetro à altura do peito para cada indivíduo;

H (m) é a altura do indivíduo.

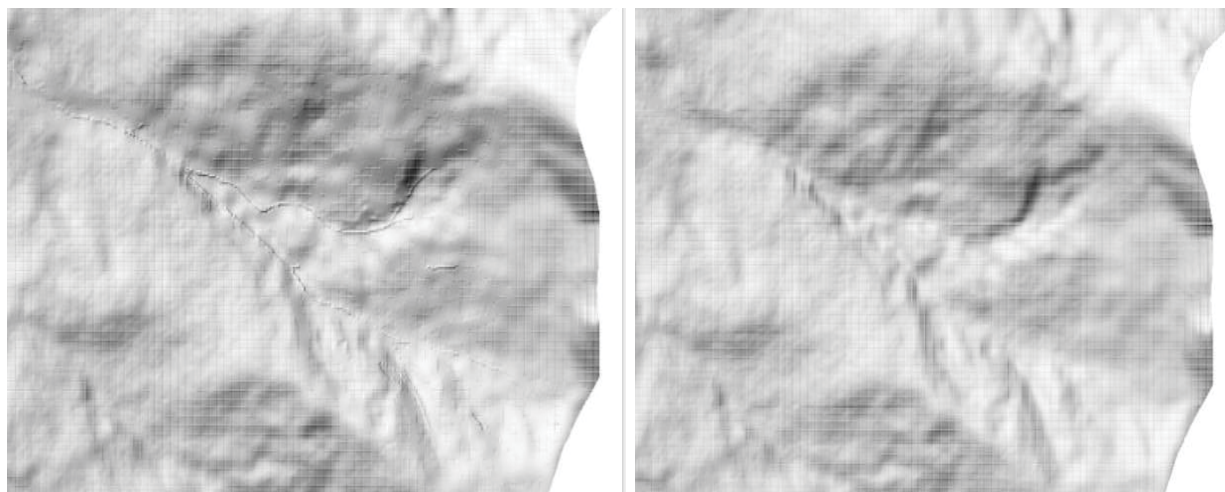
Os cálculos foram realizados por meio do software QGIS, uma vez que as alturas de vegetação estavam expressas em dados espaciais. Dessa forma foram estimados os valores de volume de detritos lenhosos para todas as cicatrizes/sub bacias da bacia hidrográfica do rio Jacareí.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Modelo digital de terreno em boa resolução simulado para condições pretéritas ao levantamento original

O resultado da aplicação do modelo GAM ajustado aos MDTs disponíveis, MDT REMODELADO, é demonstrado na Figura 37. Ressalta-se que foi realizado um recorte da bacia de modo a excluir a sub-bacia do rio das Pedras a nordeste, apenas para fins de economia de memória durante as simulações. A Figura 37 a) e b) expressam a diferença entre os resultados destes métodos, respectivamente o MDT preenchido e o MDT remodelado por meio de modelos aditivos generalizados. Este último resultado foi utilizado em procedimentos de modelagem de dispersão de fluxos de detritos em estudos subsequentes e será referenciado ao longo deste texto como MDT REMODELADO.

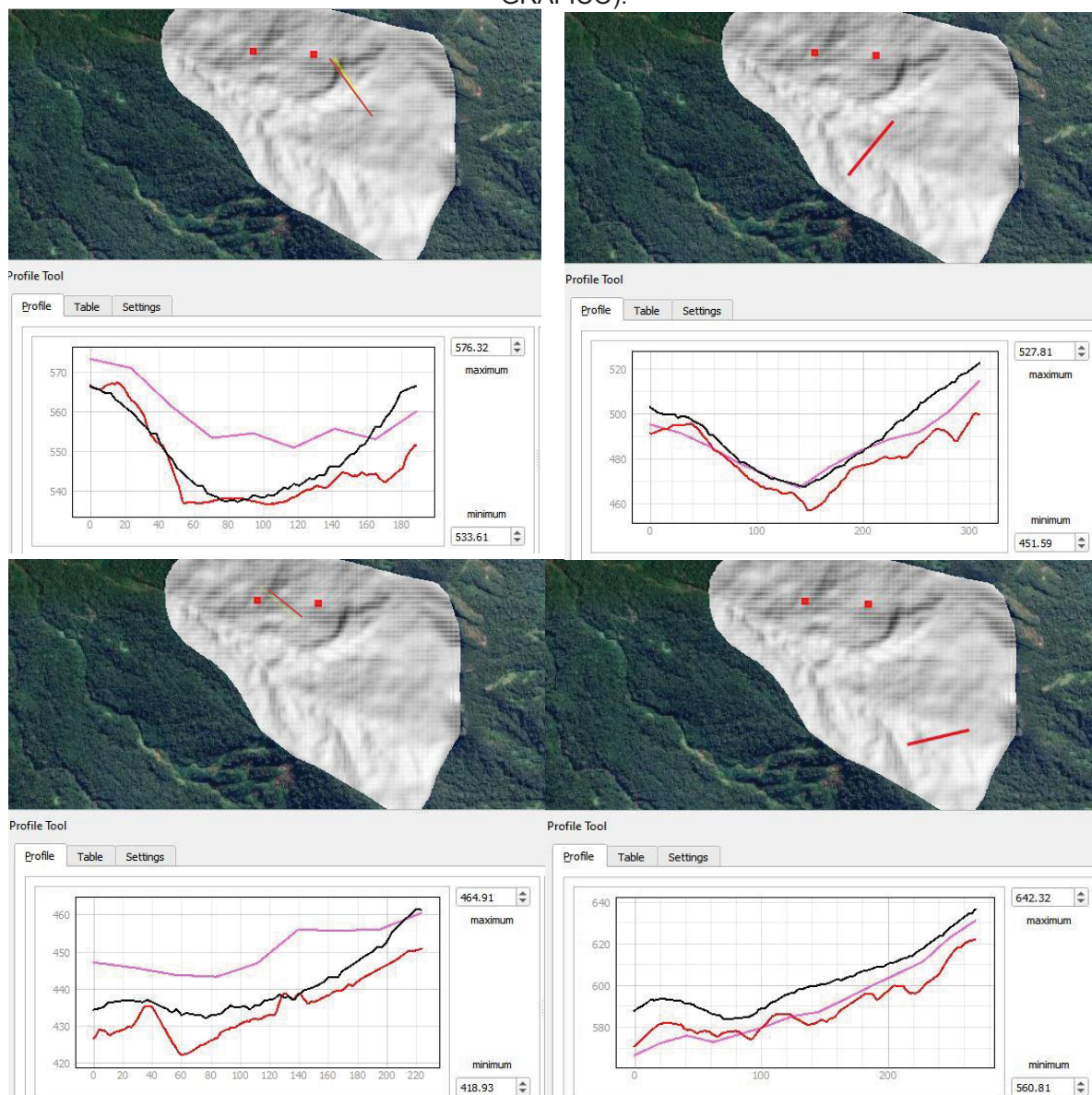
FIGURA 37 - COMPARAÇÃO VISUAL ENTRE RESULTADOS DE MDT PREENCHIDO E MDT REMODELADO.



FONTE: A AUTORA (2021).

Observa-se que houve ganho na qualidade do modelo digital de terreno com o uso do modelo aditivo generalizado no seu preenchimento, o que gerou formas mais suaves, especialmente nas regiões dos talwegues, como indicam a Figura 38 e a Figura 39. As figuras a seguir apresentam alguns perfis transversais de vertentes escorregadas. Nos gráficos o MDT REMODELADO consta em cor preta. O MDT AGUASPARANÁ consta em rosa e um levantamento LIDAR feito na região da sub-bacia do Gigante após o evento aparece em vermelho.

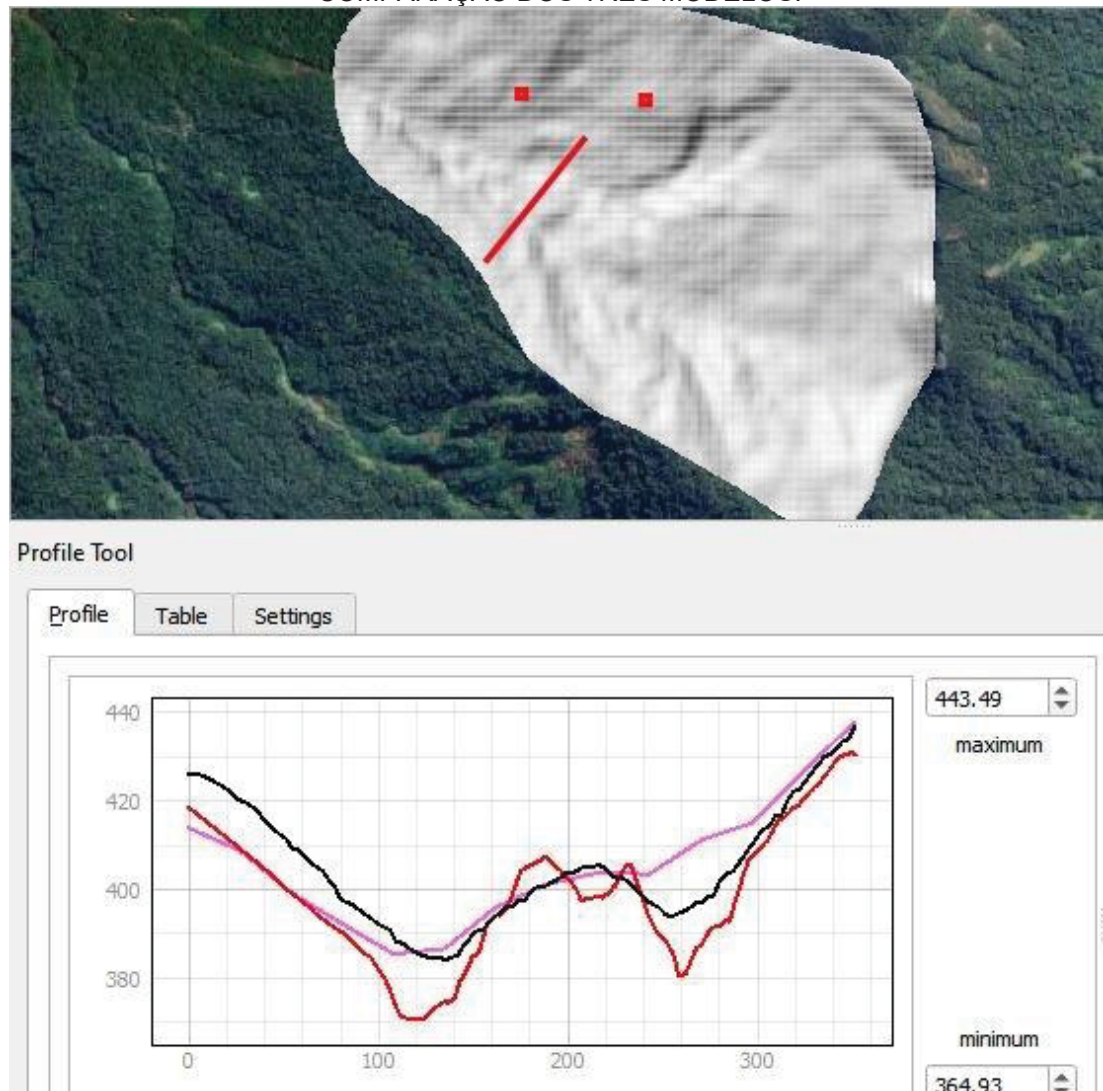
FIGURA 38 – SEÇÃO TRANSVERSAL (EM VERMELHO NO MAPA) DE EXMPLO — DIFERENÇAS ENTRE O MDT REMODELADO (PRETO NO GRÁFICO) E O MDT PREENCHIDO (VERMELHO NO GRÁFICO).



FONTE: A AUTORA (2022).

Apesar das diferenças entre as resoluções dos modelos, é possível observar que o MDT REMODELADO apresenta boa coincidência com as formas de ambos os modelos, com a diferença de apresentar preenchimento em alguns pontos que aparecem já aparentemente escavados no modelo LIDAR em vermelho. Esse era o efeito esperado para o MDT REMODELADO, que deveria representar tanto as características pretéritas à escavação quanto possui uma resolução adequada (2,5m).

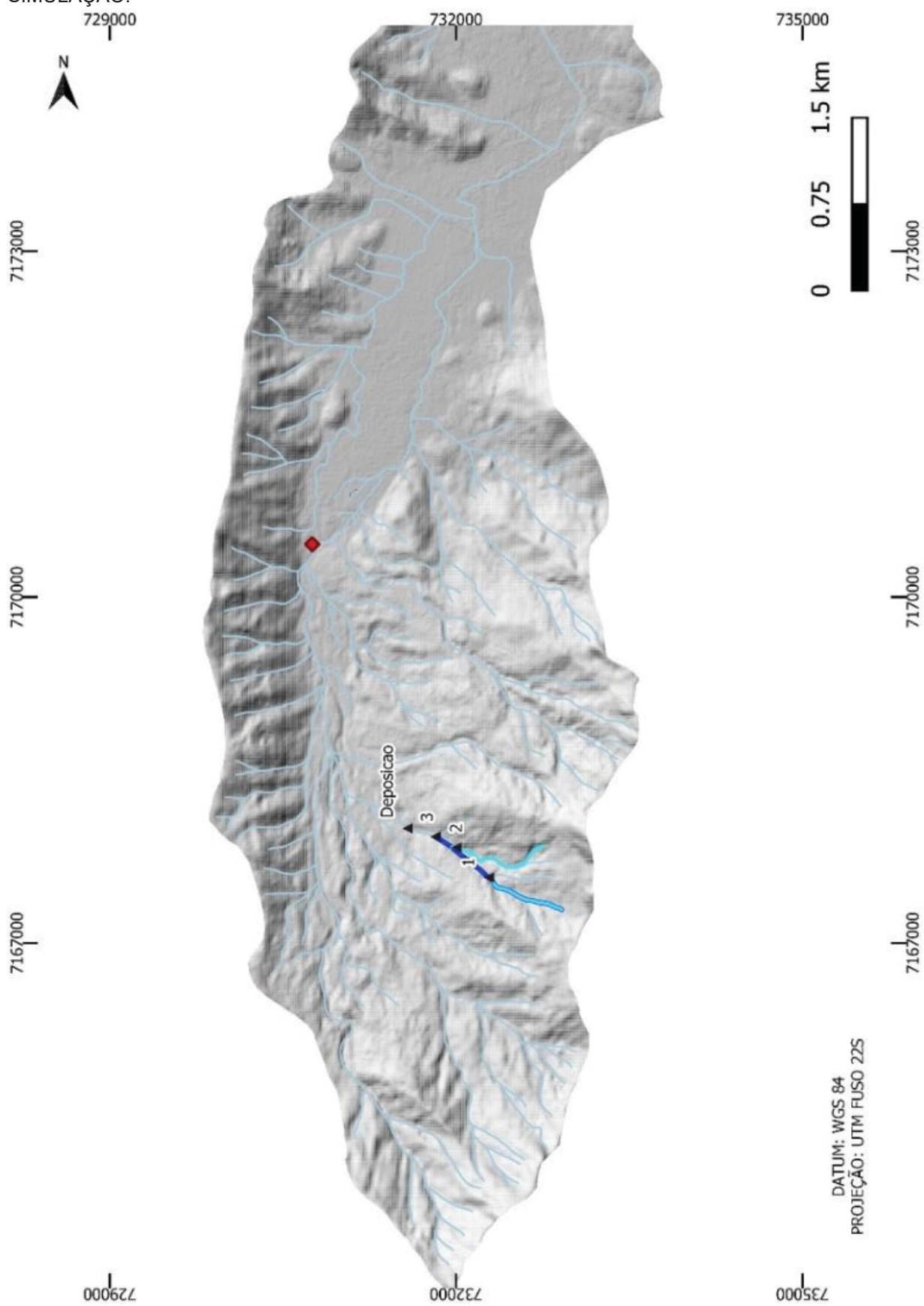
FIGURA 39 – EXEMPLO DE SEÇÃO TRANSVERSAL EM ÁREA DE MGM, COM PERFIS DE COMPARAÇÃO DOS TRÊS MODELOS.



FONTE: A AUTORA (2022).

A seguir apresenta-se de forma completa o MDT resultante.

FIGURA 40 – MDT REMODELADO E FEIÇÕES PERTINENTES A ETAPAS POSTERIORES DE SIMULAÇÃO.



FONTE: A AUTORA (2021).

5.3.2 Cálculo do volume escorregado durante o evento (volume observado - cicatrizes)

O volume escorregado desde as cicatrizes e mensurado por meio de técnicas de análise espacial (volume observado *Vobs*) foi de 295.647,83 m³ para a subárea 1; 372.243,53 m³ para a subárea 2 e 687.580,03 m³ para a totalidade da subárea 3, que corresponde à toda sub-bacia do rio Gigante. Este valor corresponde a uma camada de 68,76 metros de altura composta por detritos cobrindo a extensão de um campo de futebol.

5.3.3 Estimativa de altura da vegetação e volume de detritos lenhosos

A seguir apresentam-se os resultados das estimativas de altura de vegetação e volume de detritos lenhosos para cada sub-bacia da área de estudo onde houve remoção da cobertura vegetal. Estimou-se com base na vegetação do entorno imediato que ambas possuíam nas áreas das cicatrizes predominância de vegetação de grande porte, com alturas superiores a 15 metros. Entretanto, em relação ao volume, as bacias 7 e 1 tiveram maior expressão por serem mais extensas e conseqüentemente possuem mais indivíduos. Os valores estimados destas variáveis por sub-bacia podem ser observados na Tabela 7.

TABELA 7 - ESTIMATIVA DE ALTURA E VOLUME DA VEGETAÇÃO NA PARTE INTERNA DAS CICATRIZES PARA TODAS AS SUB-BACIAS.

BACIA E ALTURA	ÁREA OCUPADA (HA)	VOLUME ESTIMADO (M ³)
Do Meio	1,39	915,26
0 a 5 (m)	1,08	469,51
10,1 a 15 (m)	0,31	445,74
Do Meio II	1,24	1783,58
10,1 a 15 (m)	1,24	1783,58
Gigante	51,96	79223,09
> 15 (m)	23,3	43038,34
0 a 5 (m)	4,93	2143,34
10,1 a 15 (m)	23,53	33844,59
5,1 a 10 (m)	0,2	196,82
Jacareí I - Montante	76,14	88745,93
> 15 (m)	0,67	1237,61
0 a 5 (m)	7,18	3121,58
10,1 a 15 (m)	37,84	54427,34
5,1 a 10 (m)	30,45	29959,40
Jacareí Principal	20,31	10402,53
0 a 5 (m)	18,39	7995,31
10,1 a 15 (m)	1,14	1639,71
5,1 a 10 (m)	0,78	767,51

BACIA E ALTURA	ÁREA OCUPADA (HA)	VOLUME ESTIMADO (M³)
NE	1,77	2096,04
10,1 a 15 (m)	0,78	1122,03
5,1 a 10 (m)	0,99	974,00
São Sebastião	38,29	29825,53
0 a 5 (m)	22,12	9616,91
10,1 a 15 (m)	9,46	13606,76
5,1 a 10 (m)	6,71	6601,85
SE I	27,92	42845,31
> 15 (m)	18,21	33636,47
0 a 5 (m)	4,6	1999,87
10,1 a 15 (m)	4,8	6904,06
5,1 a 10 (m)	0,31	304,90
Tingidor	43,46	56605,59
> 15 (m)	1,25	2309,01
0 a 5 (m)	5,13	2230,31
10,1 a 15 (m)	34,29	49321,31
5,1 a 10 (m)	2,79	2744,96
Tingidorzinho	20,04	27079,50
10,1 a 15 (m)	16,2	23301,45
5,1 a 10 (m)	3,84	3778,05
Torto - Gigantinho	25,1	19880,91
> 15 (m)	0,31	572,42
0 a 5 (m)	16,29	7082,30
10,1 a 15 (m)	8,5	12226,19
Total Geral	307,62	359403,25

FONTE: A AUTORA (2021).

As bacias 6 e 2 apresentaram maiores alturas de vegetação pelo método utilizado.

Em relação ao volume, o total estimado de detritos lenhosos escorregados na ocasião em toda bacia hidrográfica é de 359.403 m³. As bacias que mais geraram detritos lenhosos foram as bacias do Gigante (6) com 79.223 m³ e do Jacaré I – Montante (1) com 88.746 m³. De forma geral o resultado corrobora em alguns pontos com as observações de Scheer et al. (2012) principalmente na cabeceira da bacia, em relação às alturas reduzidas da Floresta Ombrófila Mista Alto-Montana.

Em relação às subáreas selecionadas para este estudo, os volumes de vegetação mobilizados apresentam-se na Tabela 8.

TABELA 8 - ESTIMATIVA DE ALTURA E VOLUME DA VEGETAÇÃO NA PARTE INTERNA DAS CICATRIZES NAS SUBÁREAS DE SIMULAÇÃO.

ÁREA 1		
ALTURA (m)	ÁREA (Ha)	VOLUME (m³)
> 15 (m)	3,41	5815,95
10,1 a 15 (m)	14,73	19572,61

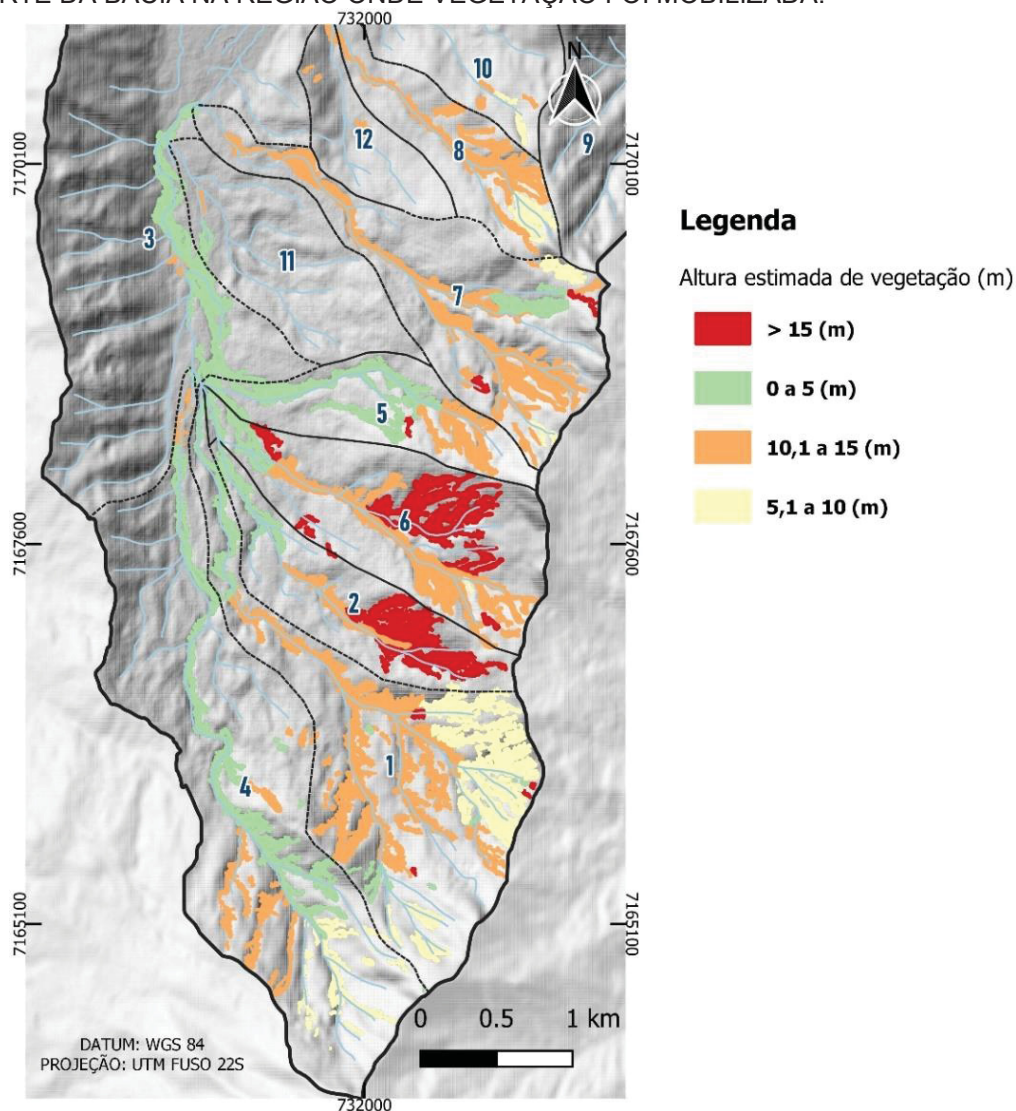
5,1 a 10 (m)	0,20	180,90
Total Geral	18,33	25569,46

ÁREA 2		
ALTURA (m)	ÁREA (Ha)	VOLUME (m ³)
> 15 (m)	17,43	29743,99
10,1 a 15 (m)	0,45	594,26
Total Geral	17,88	30338,26

ÁREA 3		
ALTURA (m)	ÁREA (Ha)	VOLUME (m ³)
> 15 (m)	21,00	35842,78
10,1 a 15 (m)	19,87	26407,90
5,1 a 10 (m)	0,20	180,90
Total Geral	41,07	62431,58

FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 41 - ESTIMATIVA DE ALTURA DA VEGETAÇÃO NA PARTE INTERNA DAS CICATRIZES – RECORTE DA BACIA NA REGIÃO ONDE VEGETAÇÃO FOI MOBILIZADA.



FONTE: A AUTORA (2021).

5.4 CONCLUSÕES

No presente estudo buscou-se unir técnicas de geoprocessamento e modelagem estatística para a resolução de problemas de disponibilidade de dados de resolução adequada para modelagem de movimentos gravitacionais de massa. As soluções buscadas também foram pensadas para reduzir o custo computacional dos procedimentos e viabilizar o uso por parte de outros pesquisadores. Nesse âmbito, a utilização conjunta da linguagem R e do software QGIS propiciou uma solução viável, mesmo para conjuntos de dados pesados como são os modelos digitais de terreno de boa resolução. A utilização de modelos aditivos generalizados se revelou uma forma computacionalmente viável e com geração de resultados fisicamente factíveis. O modelo pode ainda ser melhorado a partir de outras métricas de avaliação. Conclui-se que este tipo de modelo é uma alternativa passível de uso no estabelecimento da relação entre variáveis espaciais e pode ser mais explorado para outros dados desse tipo no âmbito das geociências.

Ainda, em relação aos métodos utilizados para estimativa da vegetação, recomenda-se que sejam realizados novos testes e validações *in loco* acerca dos dados de altura da vegetação, para que se assegure que a extrapolação dos dados do entorno para a parte interna da cicatriz seja válida na estimativa de dados do passado.

As análises desenvolvidas neste capítulo permitem concluir que há possibilidades viáveis de manejo de dados inclusive para situações passadas sobre as quais se dispõe de dados de baixa resolução. Mais especificamente no contexto paranaense, as mesmas técnicas aplicadas para estes dados na bacia hidrográfica do rio Jacareí podem ser utilizadas para toda área de abrangência dos dados utilizados, que corresponde à maior parte da região da Serra do Mar paranaense. Incentiva-se que isso seja realizado para que avancem os testes de aplicabilidade destas técnicas e sejam aproveitados os bancos de dados disponíveis no estado.

6. MODELAGEM DE FLUXO DE DETRITOS E A CONTRIBUIÇÃO DA SUB-BACIA DO RIO GIGANTE DURANTE O EVENTO “ÁGUAS DE MARÇO”.

6.1 INTRODUÇÃO

Os fluxos de detritos decorrem da ação da gravidade sobre materiais presentes nas vertentes (rochas, solo, vegetação), que os induz a um comportamento fluido geralmente potencializado ou causado pela presença da água. O aumento da pressão de saturação promove a desestabilização de grandes volumes, contribuindo para a ocorrência de escorregamentos em ambientes tropicais. Quando o material escorregado atinge canais fluviais com aumento vertiginoso da vazão associado à precipitação, configuram-se os fluxos de detritos iniciados a partir de escorregamentos (TAKAHASHI, 2014). Há tendência para formação de fluxos de detritos de origens similares em locais onde ocorrem sub-bacias confinadas (BRUMMER, 2006). Intrinsecamente, o relevo brasileiro da Serra do Mar dispõe de diversos locais com esta propensão.

O relevo e a geologia estão relacionados aos fatores de ocorrência de fluxos de detritos assim como o solo e a cobertura da terra (COSTA e WIECZOREK, 1987). Os atributos geológicos são relevantes para este processo pois condicionam a composição do solo e a forma das vertentes a partir de seus atributos químicos e mineralógicos. A resistência dos maciços e sua posição influenciam a permanência ou o transporte de sedimentos e minerais intemperizados que constituem parte do solo. Durante milhares de anos este sistema consolida relativa estabilidade, apesar da ação da força gravitacional sobre as massas de solo e vegetação. Contudo, especialmente em áreas declivosas, o caráter dinâmico deste sistema é acentuado. Estão sempre sujeitos à ação meteorológica e às transformações impostas pelos processos erosivos, sobretudo os fluviais e de escoamento. E eventualmente, especialmente a partir de chuvas intensas, derramamentos de lava ou sismos, ocorrem os movimentos gravitacionais de massa, como casos extremos desse cenário de interação entre tempo, relevo, estrutura e ciclo hidrológico.

Outro aspecto importante neste contexto envolve as transições do perfil geológico/regolítico. A presença de falhas e rupturas abruptas nos tipos de materiais deste perfil pode gerar descontinuidades e planos de ruptura. Camadas heterogêneas de solo ou o contato direto entre rocha e solo podem favorecer a instabilidade deste material. Este aspecto é comumente observado em locais cujo solo é produto de

transportes anteriores, como é o caso dos depósitos coluvionares. Este tipo de pacote deposicional é, em geral, observável na paisagem (WILFORD, 2004) e pode conter grandes blocos de rocha no caso dos depósitos de tálus. Nestes casos, há locais propícios aos movimentos gravitacionais de massa, em que a ocorrência pretérita deles é denunciada na paisagem a partir de evidências como blocos já visivelmente movimentados. Estes materiais são suscetíveis a novas mobilizações especialmente com a incidência de chuvas fortes.

Além dos aspectos de forma da vertente, diretamente associados à gravidade incidente sobre as massas, os fluxos de detritos são influenciados pela mistura de diferentes materiais. As variações entre as características geomorfológicas e pedológicas dos materiais envolvidos em fluxos de detritos implicam na variação da poro-pressão, da liquefação e da força, aspectos intrínsecos ao fenômeno, como destacado por Iverson (2003). Do ponto de vista mecânico, a trajetória, o alcance e os impactos gerados pela passagem de um fluxo de detritos estão associados à influência das forças dos sólidos e dos fluidos sobre o fenômeno, que dificilmente são homogêneos nos fluxos de detritos naturais. No caso da porção fluida, raramente podem ser considerados como água, uma vez que as propriedades físicas envolvem a concentração e a granulometria das partículas em suspensão presentes. No caso dos detritos pode haver também muita variabilidade com a presença de grandes blocos, troncos ou blocos menores. Os primeiros geralmente compõem a parte frontal do fluxo e se depositam a montante; os blocos menores em geral transportam-se por saltos, gerando grande atrito com o leito do rio (TAKAHASHI, 1981). A forma como o fluxo se molda ao longo de sua trajetória dependerá destas características e das tensões internas e externas que elas impõem.

A reologia é um ramo da física que estuda estas características por meio da análise de propriedades como a elasticidade, a viscosidade e a plasticidade. A viscosidade é a propriedade da resistência interna de uma substância à tensão. Esta é a propriedade que mais distingue os fluxos de detritos de fluxos como o da água. A tensão de cisalhamento é outro conceito físico extremamente relevante, sendo ele a força contrária à força do fluxo. Esta força contrária é imposta à massa pelas “paredes” do entorno e eventualmente em camadas heterogêneas do fluido. Gera-se a partir disso um gradiente de velocidade, que aumenta conforme a proximidade da

força incidente e decresce até 0 conforme a proximidade da parede e no contato com ela.

O ar e a água são tratados como fluidos newtonianos, por apresentarem baixa viscosidade, fluírem com mais facilidade e resistirem pouco às tensões a eles impostas, com deformações que variam linearmente conforme a tensão incidente. Já os fluidos não newtonianos resistem mais às irregularidades do entorno por possuírem maior viscosidade e não se deformarem linearmente. A Figura 42 apresenta a relação entre a taxa de deformação de diferentes categorias de fluidos e a tensão de cisalhamento a eles imposta, e diferencia o comportamento dos fluidos sob estes aspectos.

FIGURA 42 – DEFORMAÇÃO DOS FLUIDOS CONFORME TENSÃO DE CISALHAMENTO APLICADA.

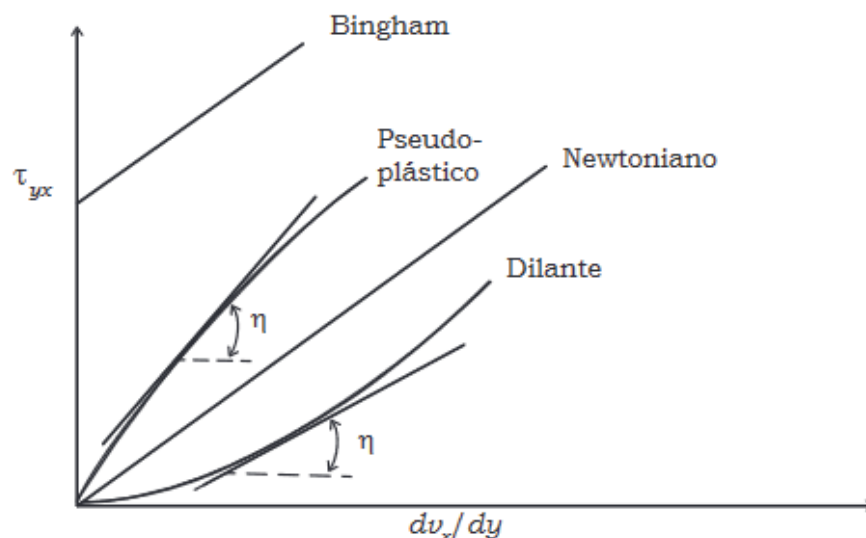


Figura 2.1

onde η é um coeficiente, função de τ_{yx} ou de dv_x/dy . Quando η diminui com o aumento de dv_x/dy , o material é chamado *pseudoplástico* e, no caso contrário, de *dilatante* (Fig. 2.1).

FONTE: COIMBRA (2015).

Conforme observa-se na Tabela 9, os fluxos de detritos com grande porcentagem de detritos rochosos e maior densidade são considerados não-newtonianos, o que implica na dificuldade de representá-los e simulá-los.

Conforme Iverson (2003), é falha a tentativa de representar fluxos de detritos considerando características reológicas uniformes, pelo que propõe a utilização de

modelos mistos para simular o fenômeno, considerando as características dos sólidos, dos fluidos e da interação entre eles.

TABELA 9 – CARACTERÍSTICAS DE FLUXOS DE DETRITOS E FLUXOS CORRELATOS.

Fenômeno	Concent. de sedimento	Densidade (g/cm ³)	Resist. cisalhante (dina/cm ²)	Tipo de fluido	Tipo de fluxo	Perfil de concentração de sedimento
Inundação brusca	1-40% (peso) e 0,4-20% (volume)	1,01–1,33	0 - 100	Newtoniano	Turbulento	Não uniforme
Fluxo hiperconcentrado	40-70% (peso) e 20-47% (volume)	1,33 – 1,8	100 - 400	Não-Newtoniano	Turbulento a laminar	Não uniforme para uniforme
Fluxo de detritos	70-90% (peso) e 47-77% (volume)	1,80–2,30	> 400	Não-Newtoniano ou viscoplástico	Laminar	Uniforme

FONTE: KOBAYAMA ET AL. (2018).

Dentre os modelos de fluxos de detritos existentes, destaca-se o Hyper Kanako (NAKATANI *et al.*; HORIUCHI *et al.*, 2012), que é um simulador numérico criado na Universidade de Kioto - Japão. A base teórica das implementações do Kanako são modelos validados por experimentos propostos por Takahashi, Nagakawa e outros em 1991. Em 1991, estes pesquisadores propuseram um modelo voltado ao cálculo das variações temporais de descarga, concentração de sólidos e de tamanho médio de partículas no sentido vertical (TAKAHASHI *et al.*, 1991). O modelo parte dos mesmos princípios do modelo antecessor Kanako 2D, que possui aplicações bem-sucedidas na região sul do Brasil (PAIXAO E KOBAYAMA, 2017; MICHEL E KOBAYAMA, 2019; VILLELA E KOBAYAMA, 2019; FRANCK *et al.*, 2021; PAIXAO *et al.*, 2021). O Hyper Kanako apresenta grandes ganhos de usabilidade em relação ao antecessor principalmente pela interface associada ao software QGIS, software livre de sistemas de informações geográficas. O Hyper Kanako é utilizado por instituições governamentais no Japão, principalmente pela sua capacidade de criação de cenários com barramentos reais ou ideais, tornando-o útil para fins de planejamento e gerenciamento de risco (NAKATANI *et al.*, 2010).

Dentre as paisagens brasileiras, destaca-se a Serra do Mar como relevo acidentado e sujeito a precipitações elevadas, como relatado anteriormente. Estes aspectos contribuem para o cenário de suscetibilidade a fluxo de detritos e outros MGMs como escorregamentos e enxurradas. A porção paranaense da Serra do Mar

conta com diversos estudos neste sentido, em especial após a ocorrência de fluxos de detritos de elevada magnitude em março de 2011. Diversos mapeamentos e levantamentos de dados foram realizados na região desde então, o que gerou importante banco de informações, em especial em um dos locais mais impactados: a bacia hidrográfica do rio Jacareí. Entretanto, como exibido na FIGURA 5 do capítulo 1, a maioria dos trabalhos desenvolvidos na bacia consiste em mapeamentos de suscetibilidade. Dessa forma, a dinâmica e o comportamento dos fluxos de detritos permanecem como assunto pouco explorado, mesmo que a disponibilidade de dados sobre a área atualmente torne possível, após tratamento, a realização de simulações.

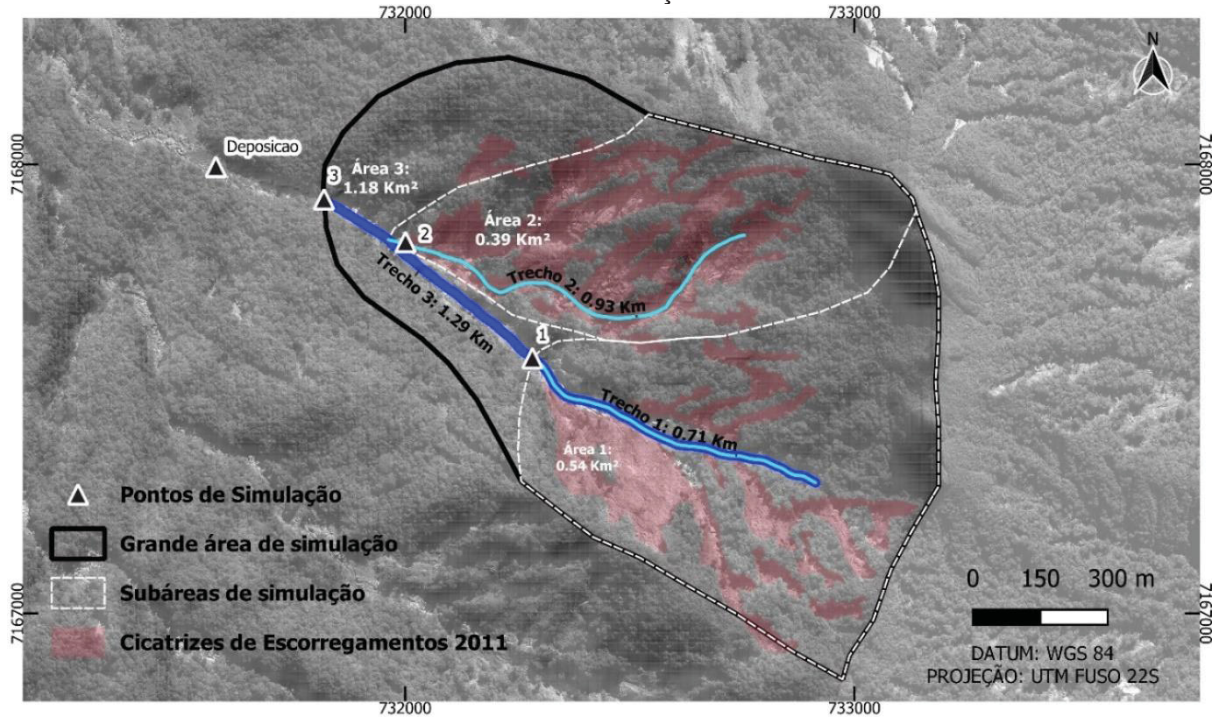
O presente capítulo tem como objetivo entender a contribuição da sub-bacia do rio Gigante para o fenômeno dos fluxos de detritos no contexto do evento Águas de Março e averiguar a aplicabilidade do modelo Hyper Kanako na região.

6.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos empregados neste capítulo dividem-se em cinco etapas: o mapeamento de feições relevantes – blocos, matacões, depósitos, cicatrizes, etc.; a reavaliação das áreas de interesse; o cálculo dos hidrogramas correspondentes ao evento de precipitação identificado no capítulo 4; a modelagem de fluxos na bacia por meio do software Hyper Kanako e a validação da simulação calibrada. De forma complementar foi avaliada a relevância de considerar a vegetação nas simulações do modelo, a partir dos dados gerados no capítulo anterior. O resumo os problemas, os métodos de solução e os dados utilizados neste capítulo. Inicialmente três áreas foram escolhidas para comparação dos resultados. Ao longo das simulações, observou-se que as subáreas 2 e 3 apresentavam resultados muito semelhantes. Diante disso, os resultados iniciais das avaliações deste capítulo são apresentados para as três subáreas e os resultados finais são apresentados apenas para as subáreas 1 e 3 (FIGURA 43).

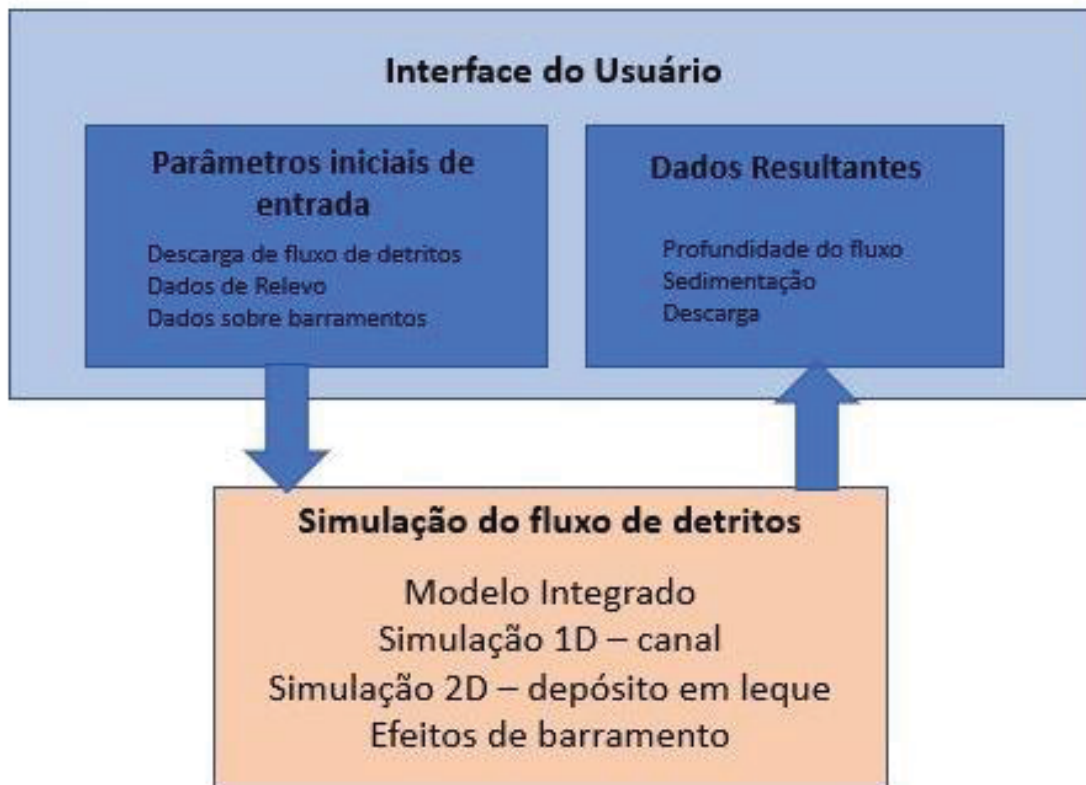
Os parâmetros de entrada e as saídas do modelo Hyper Kanako podem ser observados no fluxograma da Figura 44. O modelo Hyper Kanako versão de abril de 2019 foi gentilmente cedido pela equipe do Laboratório de Controle de Erosão da Universidade de Kioto, por intermediação com pesquisadores do IPH – UFRGS.

FIGURA 43 - ÁREAS DEFINIDAS PARA SIMULAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIO GIGANTE.



FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 44 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO MODELO.



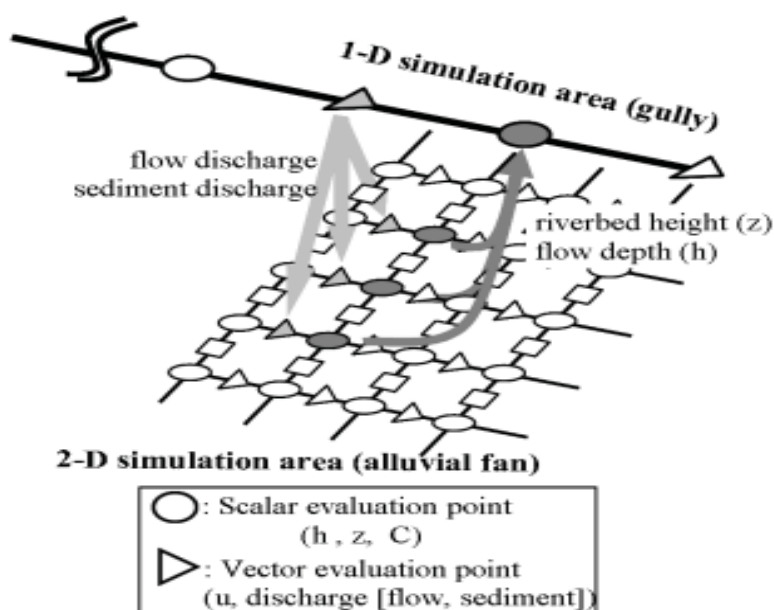
FONTE: Adaptado de NAKATANI (2012).

Quadro 4 - Quadro geral de métodos empregados neste capítulo.

PROBLEMA	DADOS/RECURSOS	MÉTODO	FERRAMENTAS
Estabelecer as áreas de interesse de simulação	- MDT res. 2.5 m (MINEROPAR/IAT, 2015)	Ênfase no detalhamento da contribuição da bacia do Gigante para o fenômeno	QGIS
Criar hidrograma do evento pluviométrico e dos fluxos de detritos do dia 11/03/2021	- Série de precipitação (h - INMET, 2019); parâmetros topográficos e de forma da bacia (MINEROPAR/IAT, 2015 e AGUASPARANA/IAT, 2013)	Hidrograma triangular. Métodos de Kirpich e Racional para estimativa da T_c , Q_p (m^3/s), Q_s ; modelo linear	QGIS - Mensuração da área de drenagem; mensuração do comprimento das drenagens; hipsometria e declividade; R - Modelo linear (lm)
Parametrização do modelo Hyper Kanako	- Tipo de solo nas áreas escorregadas (NEOSOLO LITÓLICO E CAMBISSOLO); - profundidades de solo obtidas em campo após a escavação (2014) e conforme trabalho de LOPES, 2018); - Estimativa do ângulo de atrito das partículas, conforme literatura (KOCZAK, 1995) em bacia próxima, com características de montanha)	Modelagem	Software Hyper Kanako
Calibração do modelo Hyper Kanako	Parametrização, áreas pré-estabelecidas, dado de altura de fluxo na casa-testemunho, alcance conhecido, feições relevantes mapeadas	Análise de sensibilidade	QGIS, Software Hyper Kanako
Validação do modelo Hyper Kanako	Mapeamento dos fluxos MINEROPAR (2015) Simulações realizadas em etapas anteriores	Índice de Kappa	QGIS

Nas versões mais recentes do software Kanako o movimento do fluxo é gerado a partir de um hidrograma, em que se considera a resposta da bacia a um evento de chuva. Por meio dele estima-se a altura e a força do fluxo, a espessura do depósito gerado e a máxima altura atingida por ele. Para modelar também a porção sólida, são considerados valores de concentração de sedimentos/detritos. O modelo considera, portanto, uma massa já mobilizada como dado de entrada e gera como resultado o trânsito e a deposição dessa massa.

FIGURA 45 - FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO DO MODELO



FONTE: NAKATANI (2012).

Por meio do Hyper Kanako é possível modelar em 1D a escavação promovida em um leito a partir de um fluxo, e seu transporte e deposição em 2D considerando também um leito móvel, de forma integrada para cada passo de tempo simulado pelo modelo, conforme FIGURA 45. As equações de continuidade, utilizadas para expressar o fluxo são exibidas a seguir.

Para o volume total do fluxo de detritos aplica-se a seguinte equação de balanço de massa:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right) + \left(\frac{\partial uh}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial vh}{\partial y}\right) = i \quad (2)$$

Para determinar o fluxo de detritos de uma grade de tamanho k aplica-se a equação de balanço de massa correspondente aos sedimentos:

$$\left(\frac{\partial Ckh}{\partial t}\right) + \left(\frac{\partial Ckhu}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial Ckhv}{\partial y}\right) = ikC * \quad (3)$$

Para determinação do fluxo principal (eixo x — momentum) aplica-se a equação da conservação da quantidade de movimento na direção x:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right) + u \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) = g \sin \theta wx - \frac{\tau x}{\rho h} \quad (4)$$

Para determinação da direção de fluxo cruzada (eixo y — momentum) aplica-se a equação da conservação da quantidade de movimento na direção y:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right) + u \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) + v \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) = g \sin \theta wy - \frac{\tau y}{\rho h} \quad (5)$$

Equação de balanço de massa em perfil de solo – para determinação de mudança na elevação da superfície do leito:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (6)$$

Em que:

h representa a profundidade do fluxo;

u representa a velocidade do fluxo nos sentidos de x e y;

C_k é a k-ésima concentração de sedimentos por volume de fluxo;

z é a elevação do leito;

t é o tempo;

i é a velocidade de erosão/deposição;

g é a aceleração da gravidade;

ρ é a densidade do fluido intersticial;

θwx é a declividade do leito para erosão/deposição nas direções x e y;

C^* é a concentração de sedimento por volume de camada de leito mobilizável;

τx e τy são as tensões de cisalhamento nos eixos x e y.

Em meio às etapas de preparação dos dados para inserção no modelo Hyper Kanako são gerados em forma vetorial os valores de vazão e de vazão do fluxo de detritos por meio dos hidrogramas, na unidade de m³/s. A diferença entre estes dois fluxos reside apenas na concentração de sedimentos que é considerada no segundo. Na forma matricial/espacial são gerados por meio das simulações com o modelo os

seguintes dados/valores: altura do fluxo ($H - \text{cm}$), espessura dos depósitos ($ZS - \text{cm}$), força do fluxo ($N - \text{kN}$) e altura máxima de fluxo ($W - \text{cm}$).

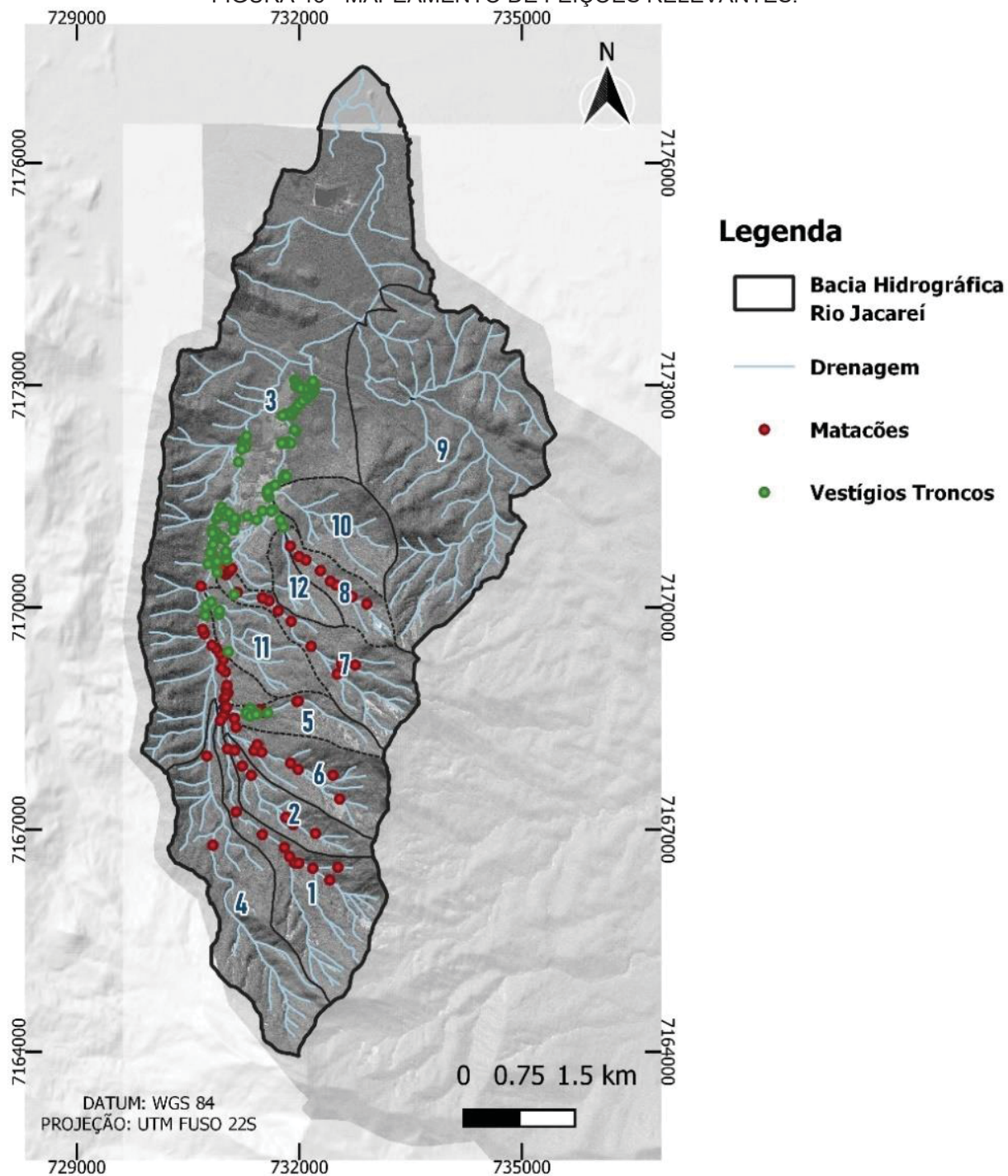
6.2.1 Mapeamento de feições relevantes: matacões e detritos lenhosos.

Como etapa prévia foram mapeadas algumas feições relevantes para os fenômenos em análise – matacões e troncos (detritos lenhosos), conforme Figura 46.

Este levantamento foi realizado a partir da busca por feições de deposições e detritos sobre uma imagem WordView do mês de maio de 2011, em que ainda eram evidentes áreas de depósitos hoje recobertos por vegetação e indistinguíveis em campo. Observa-se a concentração dos detritos lenhosos na região da planície aluvial do rio Jacareí. Observa-se também a concentração dos matacões em áreas imediatamente a montante do contato das sub-bacias com a planície aluvial principal, com maior concentração de matacões no terço superior, a montante da casa testemunho e da contribuição das bacias 7 e 8 (Figura 14 e Figura 40).

Na comparação entre o volume estimado de detritos lenhosos e o volume observado de material movimentado das vertentes, cujos dados foram revelados no capítulo 5, verificou-se que o primeiro representa menos de 10% do segundo, tanto para a subárea 1 quanto para a subárea 3. Por este motivo, e pela falta de possibilidade de maior detalhamento acerca das especificidades dos detritos lenhosos no modelo Hyper Kanako, este tipo de material não foi considerado durante as simulações.

FIGURA 46 - MAPEAMENTO DE FEIÇÕES RELEVANTES.



FONTE: A AUTORA (2021).

6.2.2 Estabelecimento dos hidrogramas do evento de fluxo de detritos

Em relação à construção dos hidrogramas dos eventos optou-se pela utilização do hidrograma triangular, técnica aplicada às três subáreas selecionadas. Associou-se o cálculo do tempo de concentração por meio da equação de Kirpich (1940), à

estimativa de vazão pelo método Racional (MULVANEY, 1851; HARVEY E CONNOR, 2017). As equações utilizadas foram:

$$tc = 57 * \left(\frac{L^3}{\Delta h}\right)^{0,385} \quad (8)$$

$$tp = 0,6 * tc \quad (9)$$

$$TP = tp + \left(\frac{d}{2}\right) \quad (10)$$

$$tb = Tp + 1,67 * Tp \quad (11)$$

$$Qp = \frac{1}{3,6} * f * i * A \quad (12)$$

$$Cd = (\rho \tan \theta) / (\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta) \quad (13)$$

$$Qsp = \left(\frac{Cx}{Cx - Cd}\right) * Qp \quad (14)$$

$$Va = Qa * t \quad (15)$$

$$Vs = Qs * t \quad (16)$$

$$Vsol = Vs - Va \quad (17)$$

Em que:

tc – tempo de concentração (minutos);

tp – tempo de pico (horas);

TP – tempo de subida do hidrograma (horas);

tb – tempo de base do hidrograma (horas);

Cd – concentração de sedimento do fluxo de detritos;

Cx – concentração do leito móvel;

Qsp – descarga do fluxo (m^3/s);

Va – volume de água (m^3);

Vs – volume do fluxo de detritos (m^3);

$Vsol$ = volume da porção sólida do fluxo de detritos.

Esta opção metodológica se deu pela simplicidade e praticidade, e por existirem aplicações anteriores destes métodos na implementação dos hidrogramas no modelo Kanako (NAKATANI et al., 2016). Os parâmetros do hidrograma triangular foram gerados por meio do cálculo do tempo de concentração, do tempo de pico, do tempo

de subida e do tempo de base, conforme as equações 8, 9, 10 e 11. A partir do tempo de pico e do tempo de base, obteve-se as equações de subida e descida por meio de regressão linear. Com base no mesmo estudo, foi estimada a vazão do fluxo de detritos a partir da vazão comum e da concentração da massa. Depois, subtraiu-se o volume de água (V_a) obtido pelo hidrograma do volume do próprio fluxo de detritos (V_s), para obtenção do volume de material sólido (V_{sol}), que serviu como parâmetro de calibração em etapas posteriores, quando comparado ao volume estimado pelas cicatrizes. Destaca-se que o evento de chuva correspondente ao hidrograma é um dos eventos definido a partir dos estudos de dados pluviométricos do capítulo 3 deste trabalho. A Tabela 10 dispõe dos resultados destes cálculos intermediários. Nela, I_{max} representa a intensidade máxima registrada durante o evento; T_c é o tempo de concentração; T_p é o tempo de pico e T_b é o tempo de base.

TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DA BACIA, DA PRECIPITAÇÃO E TEMPOS CALCULADOS

Porção	Área (Km ²)	Comprimento do canal (Km)	I_{max} (mm)	T_c (m)	T_p (h)	T_b (h)
Subárea 1	0,54	0,71	48,8	3,6847	3,7868	10,1109
Subárea 2	0,39	0,90	48,8	4,38	3,79	10,12
Subárea 3	1,18	1,19	48,8	6,09	3,81	10,17

FONTE: A AUTORA (2022).

6.2.3 Parâmetros, calibração e validação do modelo Hyper Kanako para o evento Águas de Março

Diante da grande variedade de parâmetros de entrada demandados pelo modelo Hyper Kanako, foram necessárias simulações para ajuste geral do modelo às condições da bacia e depois para ajuste fino de calibração. Foram realizadas 64 simulações com variação de parâmetros e observação da sensibilidade do modelo mediante essas alterações.

Os parâmetros de entrada do modelo se apresentam na Tabela 11, na Tabela 12 e na Tabela 13, que representam respectivamente os parâmetros da simulação 1D, os parâmetros gerais e as constantes utilizadas. Em relação aos valores empregados, alguns foram tomados a partir de referências e pesquisas no entorno, outros a partir de observações e registros de campo, outros foram mantidos conforme indicação do próprio manual do modelo (NAKATANI, 2019), e outros foram calibrados em meio às simulações. Estas escolhas estão descritas na Tabela 11 e na Tabela 12, no atributo “Origem”. Nas tabelas, a coluna “valor adotado” indica o valor que foi adotado para a simulação final do evento após as calibrações.

TABELA 11 – PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DO LEITO DO RIO (1D).

PARÂMETROS	ORIGEM	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	VALOR ADOTADO
Espessura do sedimento instável (m)	Observações	-	-	4
Intervalo de cálculo dos pontos 1D (pixel)	De acordo com resolução do MDT			5
Padrão de largura da margem na linha de 1D	Observações/Imagem			5
Profundidade mínima na porção dianteira do fluxo de detritos (1D)	Calibração/observação/diâmetro mínimo do material	0,5	2	1
Concentração de material	Calibração	0,5	0,8	0,5
Concentração de material grosseiro	Calibração	0,2	0,8	0,2

FONTE: A AUTORA (2021).

TABELA 12 - PARÂMETROS GERAIS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO COM HYPER KANAKO VÁLIDOS PARA PORÇÃO DE ESCAVAÇÃO (1D) E DE DEPOSIÇÃO (2D).

PARÂMETROS	ORIGEM	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	VALOR ADOTADO
Tempo de intervalo dos cálculos (seg)	Experiência de simulação	0,1	0,8	0,1
Densidade dos sedimentos (kg/m ³) MKS	Bibliografia			2650
Densidade da fase fluida [água, lama e silte] (kg/m ³) MKS	Como usado por Nakatani para fluxos mais densos	1000	1250	1250
Mínima profundidade de fluxo (m)	Calibrado a partir das simulações e inferido	0,01	1	0,1
Concentração do leito móvel	Bibliografia			0,65
Coefficiente de velocidade de erosão	Proposta pelo modelo			0,0007
Coefficiente de velocidade de deposição	Proposta pelo modelo			0,05
Coefficiente de velocidade de deposição considerando força inercial	Proposta pelo modelo			0,9
Tempo de simulação (seg)	Definida a partir dos hidrogramas dos subeventos de precipitação	1800	28880	17000
Diâmetro do material (m)	Para contemplar o tamanho médio dos matacões observados			0,5
Ângulo de fricção (graus)	Conforme amostra de Kocziak (2005) na região, em cambissolo associado a neossolo			23,5
Tempo de intervalo da saída do hidrograma (seg)	Definido e calibrado a partir das simulações	12	3600	900
Tempo de intervalo da saída (seg)	Definido e calibrado a partir das simulações	60	6000	3600
Direção de fluxo (graus)	Calculado para cada área por geoprocessamento após a entrada do fluxo na área 2D			44,5°

PARÂMETROS	ORIGEM	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	VALOR ADOTADO
Espessura do sedimento instável (2D) (m)	Definido a partir de observação de registros do leito escavado na área de deposição à época			0.5
Velocidade de erosão das margens	Proposta pelo modelo			1.00
Gradiente da erosão das margens (graus)	Proposta pelo modelo			37.00

FONTE: A AUTORA (2021).

TABELA 13 - CONSTANTES DE ENTRADA NO MODELO

PARÂMETROS	VALOR
Pi	3,1416
Aceleração da gravidade	9,8
Coefficiente de Rugosidade de Manning	0,03

FONTE: A AUTORA (2021).

Para definição dos valores adotados nas simulações finais do modelo Hyper Kanako utilizaram-se como parâmetros de calibração alguns dados conhecidos/mapeados na bacia.

- a) observações de campo associadas ao alcance do fluxo;
- b) observações associadas à altura do fluxo, tendo como base uma casa testemunho e as rotas conhecidas do fluxo;

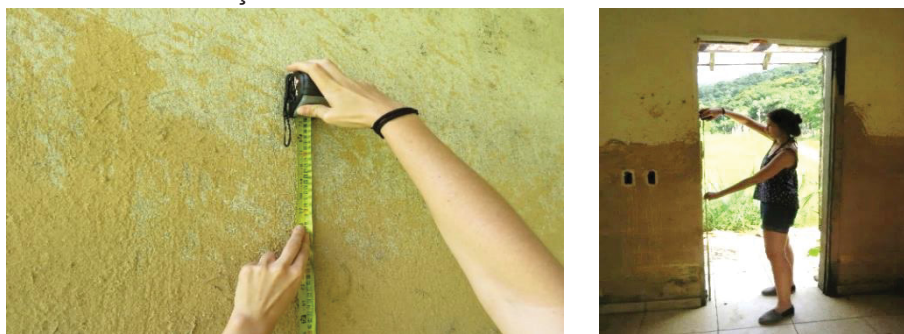
Em relação ao alcance do fluxo (a) foram utilizados os levantamentos aéreos realizados no ano do evento onde se poderia ainda identificar a trajetória do fluxo e a extensão dos depósitos, como é o caso das imagens Rapid Eye e World View realizadas à época.

Em relação à altura do fluxo (b), foi utilizado como parâmetro de calibração a altura observada em uma casa da comunidade que permanece com as marcas do desastre desde então (casa testemunho). A casa localiza-se justo a montante da confluência do rio Tingidor com o rio Jacareí (Figura 14), como ilustrado anteriormente. Estão a montante deste ponto as sub-bacias 11, 5, 2, 1, 4 e 6 (sub-bacia do rio Gigante). As alturas do fluxo no local foram medidas em alguns pontos. A altura média observada na parte interna é de 1,35 metros e de 1,80 metros na parte externa da edificação, conforme Figura 47.

Para uso da informação de altura de fluxo na casa testemunho na calibração foi necessário considerar a proporcionalidade entre as áreas de contribuição da área a

montante da casa (maior) e a área de contribuição da subárea 3, objeto das simulações finais. A área de contribuição toda a montante da casa é de 14,07 Km² e de 1,18 Km² na sub-bacia do rio Gigante. Por ser 11,92 vezes menor, considerou-se como fator de equivalência que 1/12 da altura do fluxo na casa poderia ser atribuído à contribuição da sub-bacia do Gigante.

FIGURA 47 MEDIÇÃO DA ALTURA DE LAMA NA CASA TESTEMUNHO.



FONTE: A AUTORA (2019).

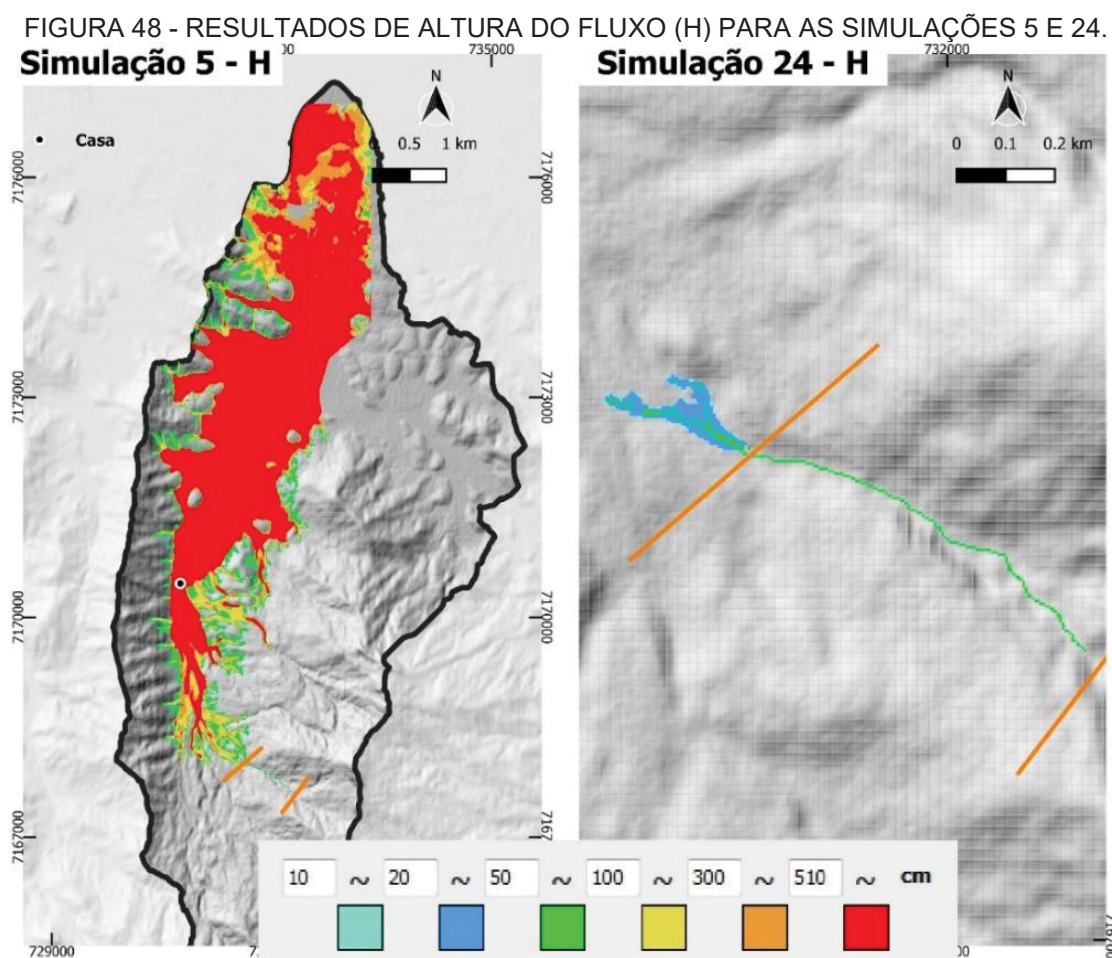
Algumas simulações se destacaram pelos resultados factíveis em relação aos parâmetros de calibração. Estas simulações foram as de números 5, 24, 37, 45, 59 e 63 realizadas para a subárea 1, e na sequência para a subárea 3. A Tabela 14 apresenta as principais alterações de parâmetros e as observações realizadas em cada rodada de simulação entre estas.

TABELA 14 – PRINCIPAIS ALTERAÇÕES DE PARÂMETRO PARA CADA SIMULAÇÃO - CALIBRAÇÃO

SIMULAÇÃO	PRINCIPAL ALTERAÇÃO	VALOR	OBSERVAÇÕES DE CALIBRAÇÃO
5	Profundidade mínima do fluxo	0,5	Resultado gerou fluxo muito acima do observado na casa testemunho
24	Intervalo de tempo, intervalo de tempo do hidrograma e profundidade mínima de fluxo	0,1; 90; 0,1	Com pouco fluxo, sem extrapolação de áreas
37	Tempo estendido em relação às simulações anteriores	7200	Fluxo passou próximo à casa testemunho com a altura de fluxo de cerca de 1m
45	Espessura da porção instável da planície	3	Sem diferenças expressivas em relação ao anterior, com ligeira influência do parâmetro alterado, significando que se trata de um dos parâmetros adequados para ajuste fino
59	Espessura do trecho 1D e profundidade mínima de fluxo	4; 0,5	Resultado factível, porém com contribuição excedente considerando apenas o aporte da bacia do rio Gigante
63	Concentração partículas grossas, controle baseado na proporcionalidade da bacia em relação a toda área a montante da casa testemunho	0,5	Aumento da altura de deposição já na linha 1D

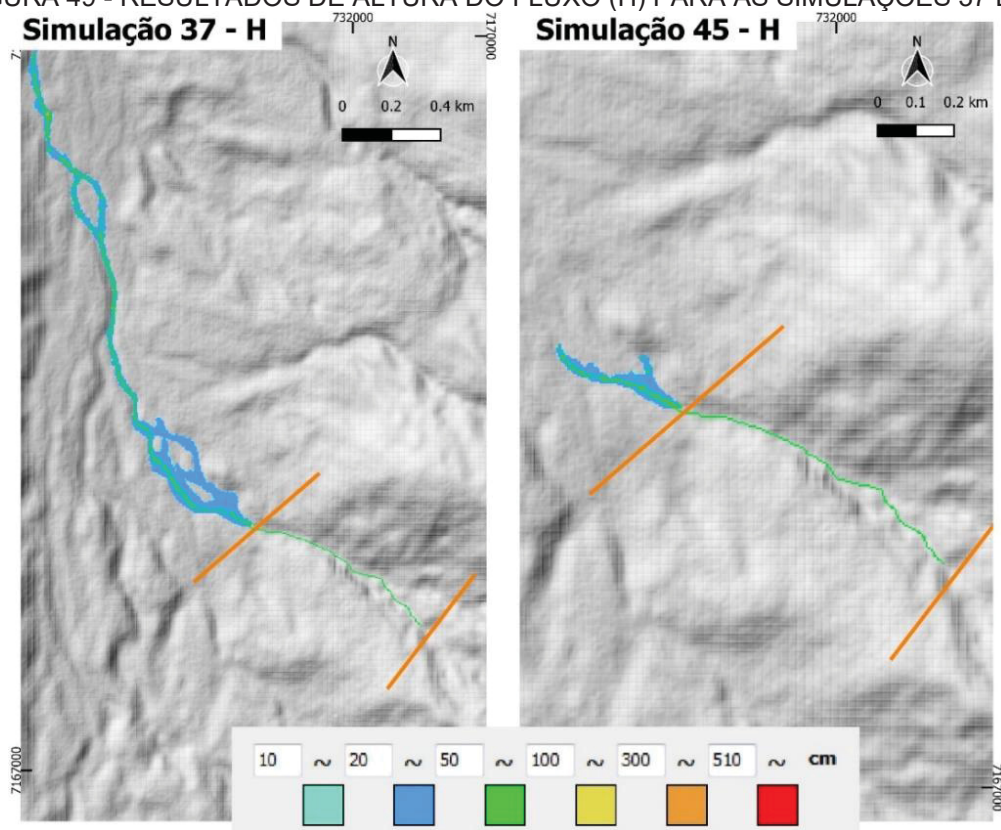
FONTE: A AUTORA (2021).

As Figuras 49 a 54 trazem os dados gerados durante a calibração sob dois aspectos passíveis de avaliação mais acuradas diante dos dados disponíveis: a altura do fluxo (H) e a espessura do depósito gerado (ZS), respectivamente para as simulações 5, 24, 37, 45, 59 e 63 descritas na Tabela 14. Nas figuras estão dispostos os resultados para o último passo de tempo definido em cada simulação. A observação dessas imagens e da tabela 14 permite visualizar a expressão espacial do processo de calibração.



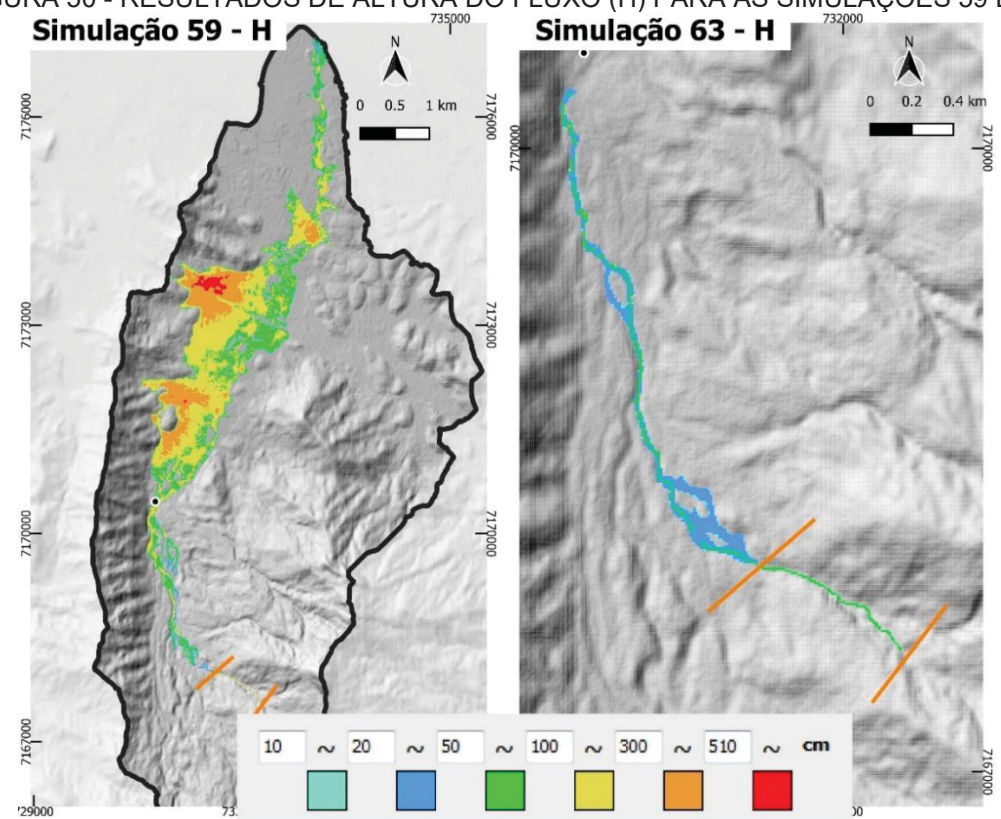
FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 49 - RESULTADOS DE ALTURA DO FLUXO (H) PARA AS SIMULAÇÕES 37 E 45.



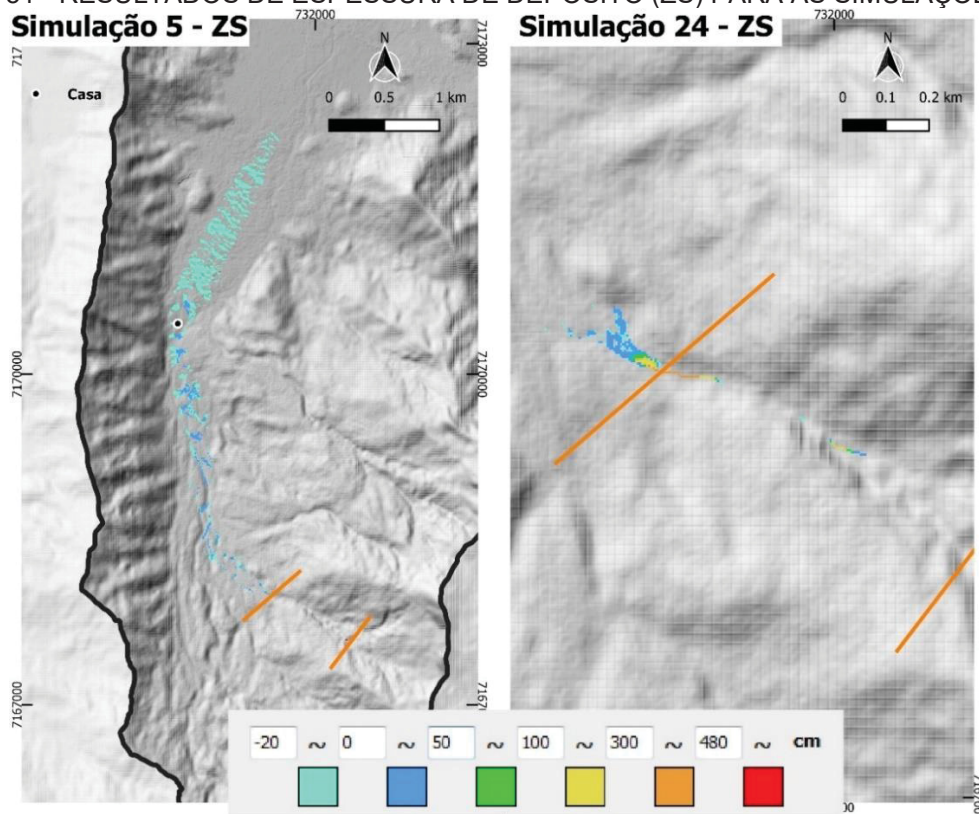
FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 50 - RESULTADOS DE ALTURA DO FLUXO (H) PARA AS SIMULAÇÕES 59 E 63.



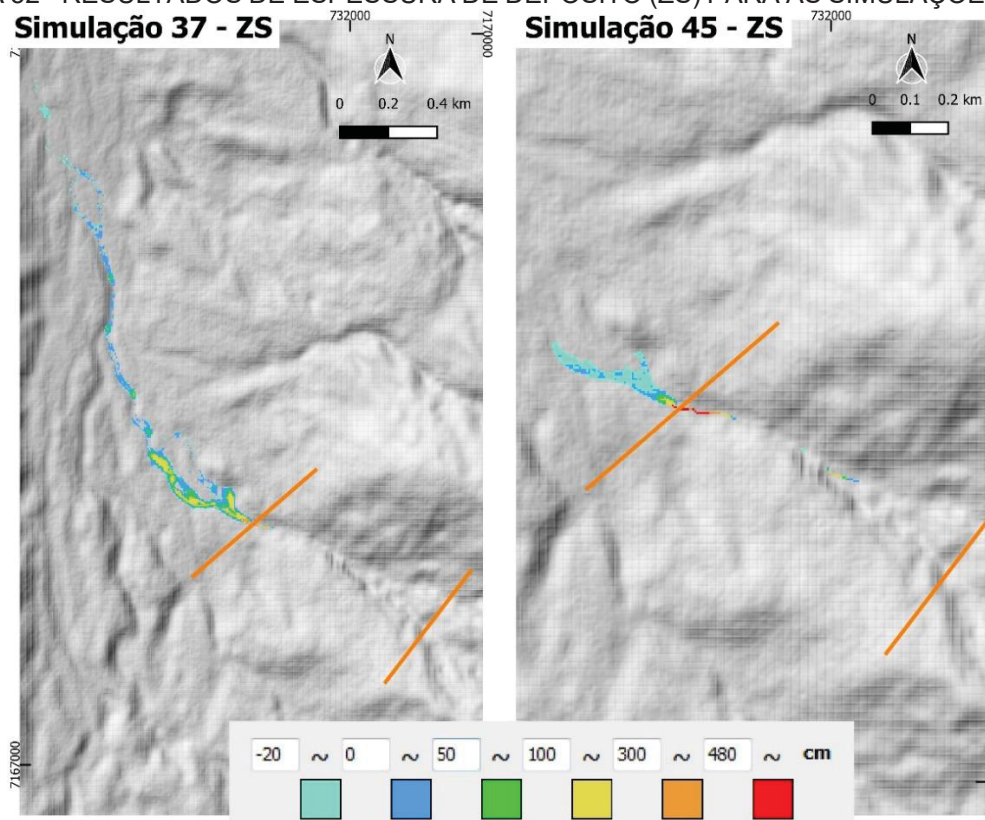
FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 51 - RESULTADOS DE ESPESSURA DE DEPÓSITO (ZS) PARA AS SIMULAÇÕES 5 E 24.



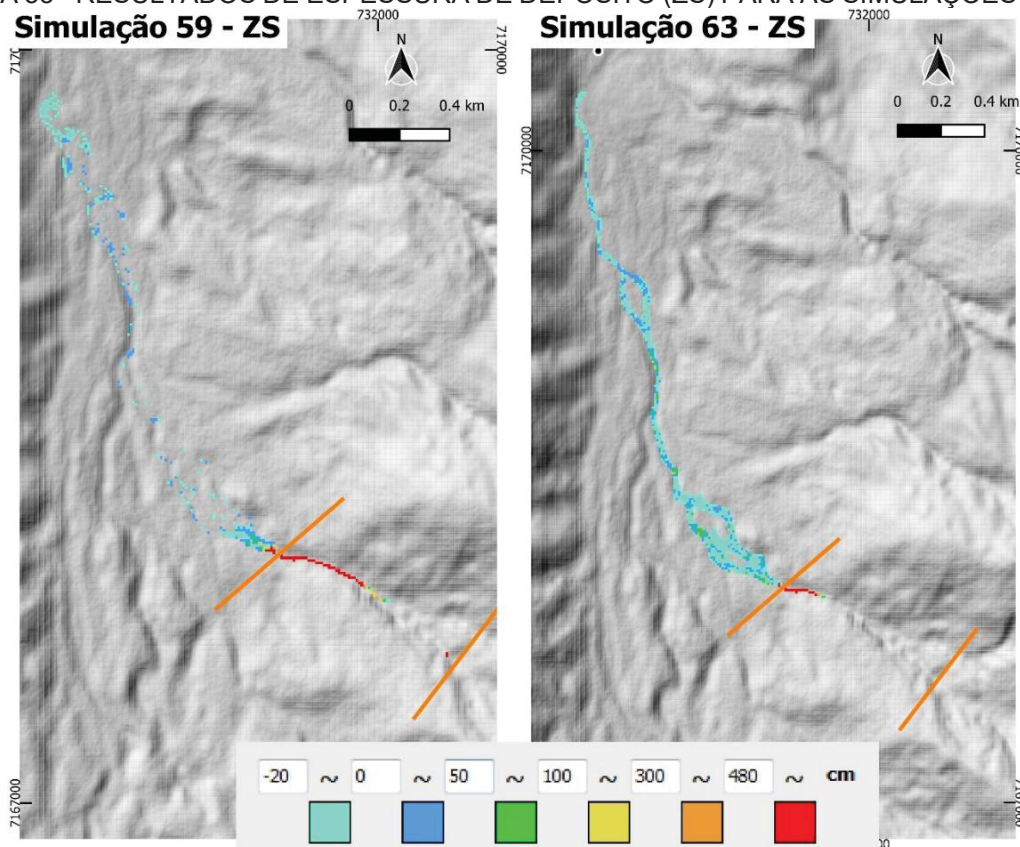
FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 52 - RESULTADOS DE ESPESSURA DE DEPÓSITO (ZS) PARA AS SIMULAÇÕES 37 E 45.



FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 53 - RESULTADOS DE ESPESSURA DE DEPÓSITO (ZS) PARA AS SIMULAÇÕES 59 E 63.



FONTE: A AUTORA (2021).

Para validação da simulação foram utilizados:

- proporção entre cicatrizes/depósitos;
- índice Kappa de coincidência espacial entre valores modelados e o que foi mapeado;
- volume observado por meio das cicatrizes (*Vobs*) em comparação com o volume resultante do hidrograma de fluxo de detritos (*Vsol*).

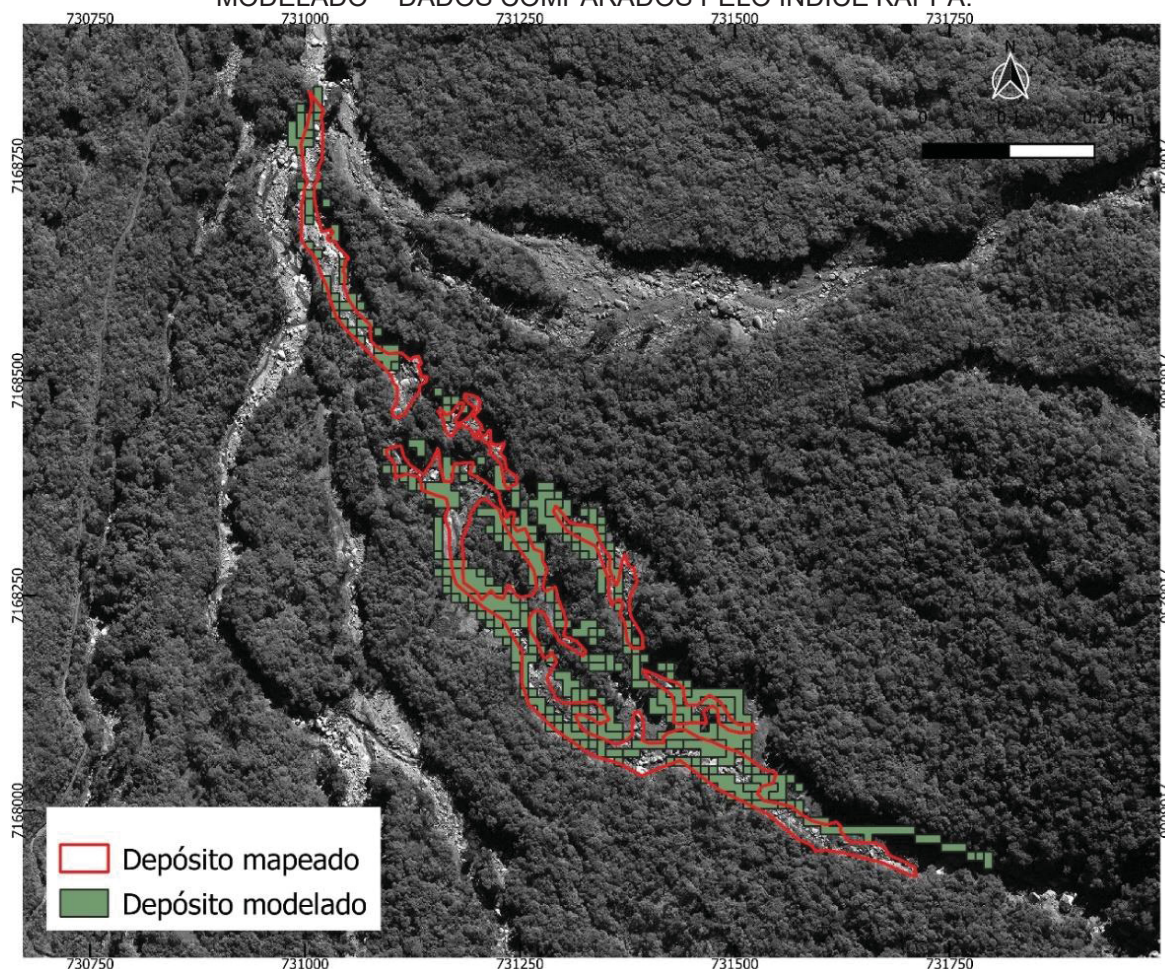
A proporção entre cicatrizes e depósitos (a) para a extensão conhecida, que compreende o aporte de toda a bacia hidrográfica do rio Jacareí à planície durante o evento. Esta proporção foi comparada com a proporção entre as áreas de cicatrizes da bacia do rio Gigante e a abrangência dos depósitos modelados por meio do Hyper Kanako.

Em relação às feições mapeadas (b), utilizou-se principalmente a região de depósitos de meia encosta onde houve aporte exclusivo da bacia hidrográfica do rio Gigante, conforme demonstra a Figura 46. Foram mapeados depósitos por meio de identificação na imagem WordView registrada 2 meses após o evento. Foram

medidas as áreas de abrangência dos depósitos mapeados e modelados e verificada a intersecção entre estas duas feições, conforme Figura 54. Para isto utilizou-se o índice Kappa (COHEN, 1960), que constitui uma métrica de avaliação de coincidência espacial que desconsidera as situações em que esta coincidência possa ter se dado por acaso. O uso desta técnica se deu por meio do software QGIS. Por este método foram avaliadas as áreas de abrangência do depósito mapeado e do depósito modelado.

Por fim, para a validação do modelo utilizou-se também os dados gerados no capítulo anterior por meio da comparação do volume (c) de material transportado que se estimou por meio do hidrograma de fluxo de detritos de entrada no Hyper Kanako (V_{sol}), com o volume observado e calculado por meio das cicatrizes e do MDT REMODELADO (V_{obs}), que foi de 295647,83 m³ para a subárea 1; 372243,53 m³ para a subárea 2 e 687580,03 m³ para a subárea 3.

FIGURA 54 – CALIBRAÇÃO – COINCIDÊNCIA ENTRE DEPÓSITO MAPEADO E DEPÓSITO MODELADO – DADOS COMPARADOS PELO ÍNDICE KAPPA.



FONTE: A AUTORA (2021).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Volume escorregado e construção dos hidrogramas

O volume escorregado desde as cicatrizes e mensurado por meio de técnicas de análise espacial (volume observado *Vobs*) foi de 295647,83 m³ para a subárea 1; 372243,53 m³ para a subárea 2 e 687580,03 m³ para a totalidade da subárea 3.

Os hidrogramas calculados para as três áreas de simulação conforme parâmetros morfométricos e o método do hidrograma triangular estão dispostos na Tabela 15, na TABELA 16, e na Tabela 17 e na FIGURA 55, na FIGURA 56 e na FIGURA 57.

TABELA 15 – DADOS DO HIDROGRAMA PARA ÁREA 1.

N	TEMPO (SEG)	VAZÃO (Q - m ³ /s)	CONCENTRAÇÃO	VAZÃO FLUXO (Qs - m ³ /s)
0,00	0	0,00	0,00	0,00
1,00	3600	1,35	0,25	2,22
2,00	7200	2,71	0,25	4,44
3,00	10800	4,06	0,25	6,65
3,80	13676,4	5,14	0,25	8,42
6,00	21600	3,33	0,25	5,46
7,00	25200	2,52	0,25	4,13
8,00	28800	1,71	0,25	2,80
9,00	32400	0,90	0,25	1,48
10,00	36000	0,09	0,25	0,15

FONTE: A AUTORA (2021).

TABELA 16 – DADOS DO HIDROGRAMA PARA ÁREA 2.

N	TEMPO (SEG)	VAZÃO (Q - m ³ /s)	CONCENTRAÇÃO	VAZÃO FLUXO (Qs - m ³ /s)
0,00	0	0,00	0,00	0,00
1,00	3600	0,98	0,25	1,60
2,00	7200	1,95	0,25	3,20
3,00	10800	2,93	0,25	4,80
3,79	13657,95	3,70	0,25	6,07
5,00	18000	3,00	0,25	4,91
6,00	21600	2,41	0,25	3,95
7,00	25200	1,83	0,25	3,00
8,00	28800	1,24	0,25	2,04
9,00	32400	0,66	0,25	1,08
10,00	36000	0,08	0,25	0,12

FONTE: A AUTORA (2021).

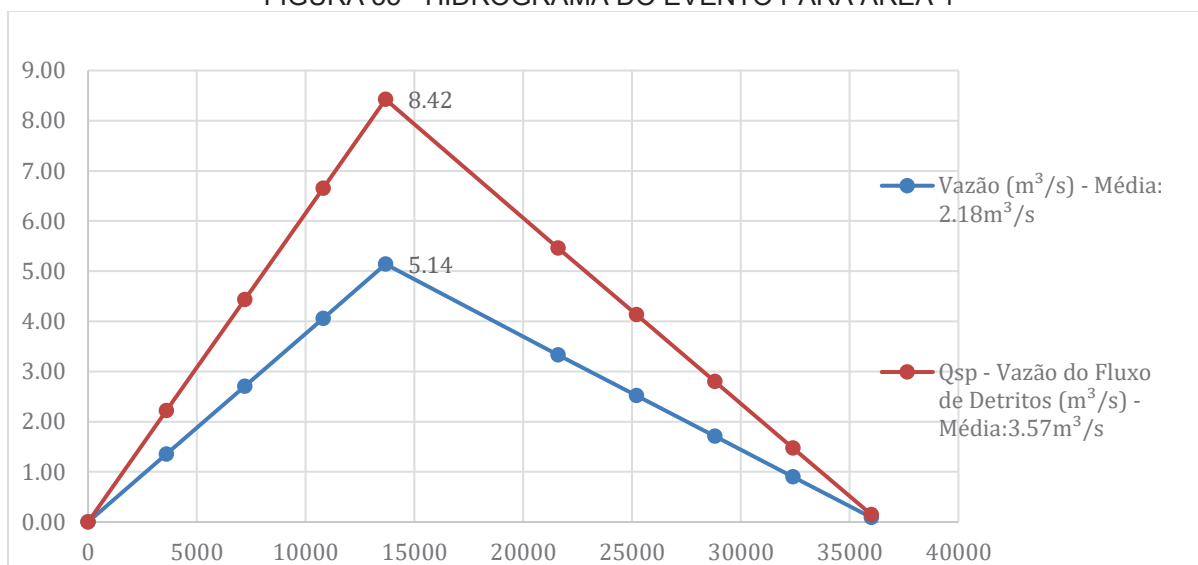
TABELA 17 - DADOS DO HIDROGRAMA PARA ÁREA 3.

N	TEMPO (SEG)	VAZÃO (Q - m ³ /s)	CONCENTRAÇÃO	VAZÃO FLUXO (Qs - m ³ /s)
0,00	0	0,00	0,00	0,00
1,00	3600	2,94	0,25	4,82
2,00	7200	5,88	0,25	9,63
3,00	10800	8,81	0,25	14,45

N	TEMPO (SEG)	VAZÃO (Q - m ³ /s)	CONCENTRAÇÃO	VAZÃO FLUXO (Qs - m ³ /s)
3,81	13719,34	11,20	0,25	18,35
6,00	21600	7,35	0,25	12,04
7,00	25200	5,59	0,25	9,16
8,00	28800	3,83	0,25	6,27
9,00	32400	2,07	0,25	3,39
10,00	36000	0,31	0,25	0,51

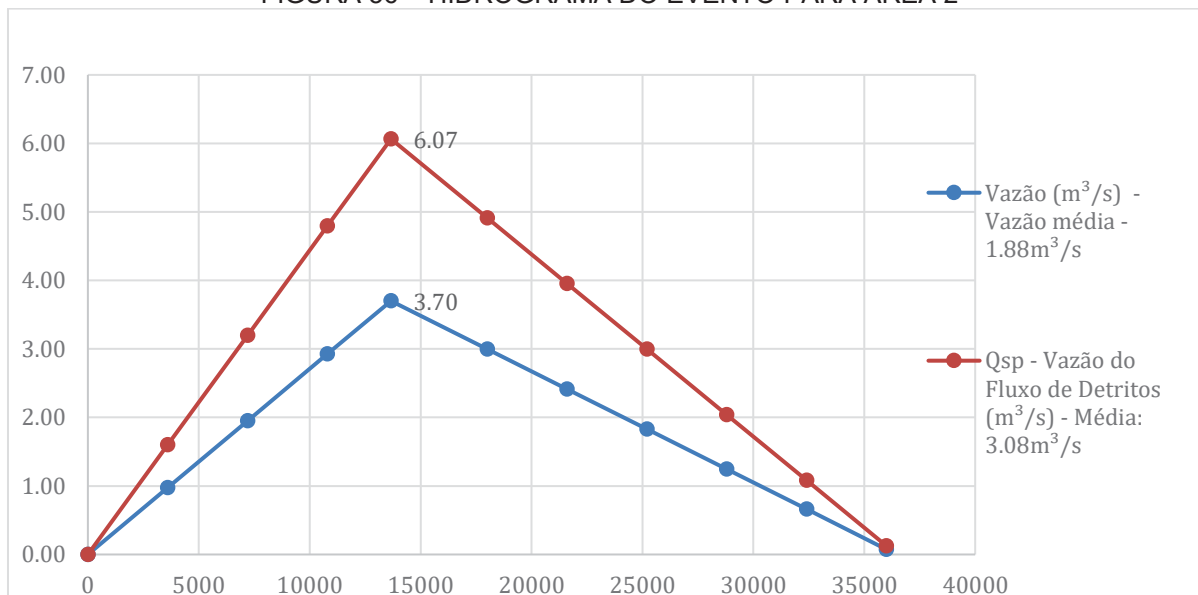
FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 55 - HIDROGRAMA DO EVENTO PARA ÁREA 1



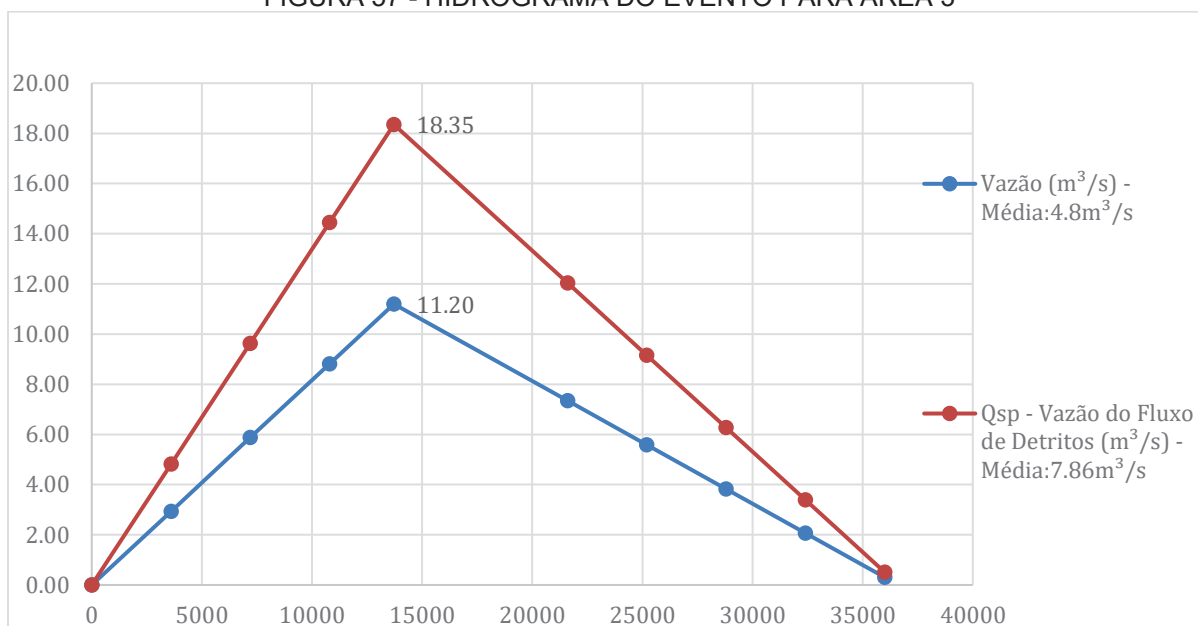
FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 56 – HIDROGRAMA DO EVENTO PARA ÁREA 2



FONTE: A AUTORA (2021).

FIGURA 57 - HIDROGRAMA DO EVENTO PARA ÁREA 3



FONTE: A AUTORA (2021).

6.3.2 Modelagem hidrogeomorfológica do evento Águas de Março de 2011 – a aplicabilidade do modelo Hyper Kanako.

A altura de fluxo observada na casa testemunho foi utilizada apenas como parâmetro de confirmação dos resultados e identificação de resultados discrepantes, uma vez que verificou-se após as outras etapas de calibração que apenas a subárea 3 correspondente à bacia hidrográfica do rio Gigante não geraria fluxo suficiente neste evento para atingir a casa na altura observada. Entretanto, esta informação foi utilizada principalmente para identificar resultados superestimados em altura e extensão nas primeiras etapas de simulação, a exemplo da Figura 48, do resultado de altura de fluxo H da simulação nº 5.

A Tabela 18 indica as abrangências do fluxo para cada área e a proporção entre a área de cicatrizes e a área de depósitos que foi utilizada como parâmetro de calibração. A proporção de área de abrangência entre cicatrizes e depósitos para a bacia toda do rio Jacareí, cujos depósitos do evento tem extensão conhecida, é de 79,9%. No caso da simulação realizada para a bacia do rio Gigante, obteve-se uma proporção de 77,5% para esta mesma relação, resultando em 97% de coincidência entre a simulação pelo modelo e o dado observado para toda a bacia hidrográfica do rio Jacareí.

Em relação às feições mapeadas, verificou-se que há correspondência de posicionamento geral em relação aos depósitos mapeados, e suficiência dos resultados da modelagem ante este critério.

TABELA 18 - EXTENSÃO/ABRANGÊNCIA DE CICATRIZES E DEPÓSITOS DOS FLUXOS

	ÁREA (m ²)		PROPORÇÃO
	CICATRIZES	DEPÓSITOS (MAPEADO E MODELADO)	CICATRIZES/DEPÓSITOS
BACIA JACAREÍ (DADOS CONHECIDOS)	1885419,06	2358414,71	79,9%
BACIA GIGANTE (DADOS MODELADOS)	303354,35	391536,84	77,5%

FONTE: A AUTORA (2021).

Porém, em termos de área de abrangência, registraram-se 28749,46 m² de depósitos modelados sem correspondência com os mapeados; 23492,14 m² de porções de depósitos mapeados sem que houvesse depósito modelado correspondente e somente 20025,15 m² onde corresponderam depósitos modelados e mapeados. Em relação à coincidência espacial entre os depósitos, obteve-se um índice de Kappa de 0,41, que é considerada nos parâmetros do método como uma concordância moderada.

No caso dos volumes, multiplicando-se as vazões de fluxo de detritos (Qs) e de água (Q) pelo tempo decorrido, foram obtidas estimativas do volume de fluxo, de sólidos e líquidos movimentados durante o evento Águas de Março. A Tabela 19 dispõe destes dados para a subárea 3 utilizada na simulação final, acompanhados do valor observado por meio da estimativa do material removido das cicatrizes. A relação entre o volume de sólidos e volume observado calculado por meio das cicatrizes está expressa na última coluna da tabela. Foi identificada correspondência de 73% entre os volumes observados por meio das cicatrizes e os volumes sólidos obtidos por meio dos hidrogramas de evento utilizados no modelo Hyper Kanako.

TABELA 19 – VOLUMES ESTIMADOS DE APORTE DA SUBÁREA 3 (BACIA DO RIO GIGANTE)

SUB ÁREA	VOL. DE FLUXO (m ³)	VOL. DE ÁGUA (m ³)	VOL. DE SÓLIDOS (m ³)	VOL. OBS. (m ³)	VOL. SÓL. / VOL. OBS. (%)
3	1293806,83	789428,45	504378,39	687580,03	73%

FONTE: A AUTORA (2021).

Verifica-se que a correspondência entre o volume de sólidos e o volume observado foi de 73% para a Subárea 3, o que foi considerado satisfatório do ponto de vista da representação do fenômeno conforme o material mobilizado.

Apresentam-se os resultados da aplicação do modelo calibrado para o evento Águas de Março para a Subárea 3, em três estágios de tempo – 3600, 10800 e 18000 segundos, para as variáveis profundidade de fluxo (H - cms), espessura de depósito gerado (ZS - cms), máxima profundidade de fluxo mais deposição (W - cms) e força do fluido em kNs (N). As figuras 57 a 60 exibem a saída matricial do modelo correspondente a estes resultados, onde é possível avaliar a distribuição espacial. A TABELA 20 apresenta a distância aproximada que o fluxo atingiu em cada passo de tempo e a velocidade considerando a trajetória do fluxo para a simulação final pós-calibração.

TABELA 20 – ALCANCES E VELOCIDADE ESTIMADOS DE APORTE DA SUBÁREA 3 SIMULADA

Passo de tempo/Variável	Comprimento (Kms)		Velocidade (Km/h)
	H/W/N	ZS	H
3600 s	0,4	0,34	6,67
10800 s	2,38	1,7	13,22
18000 s	3,68	1,93	12,27

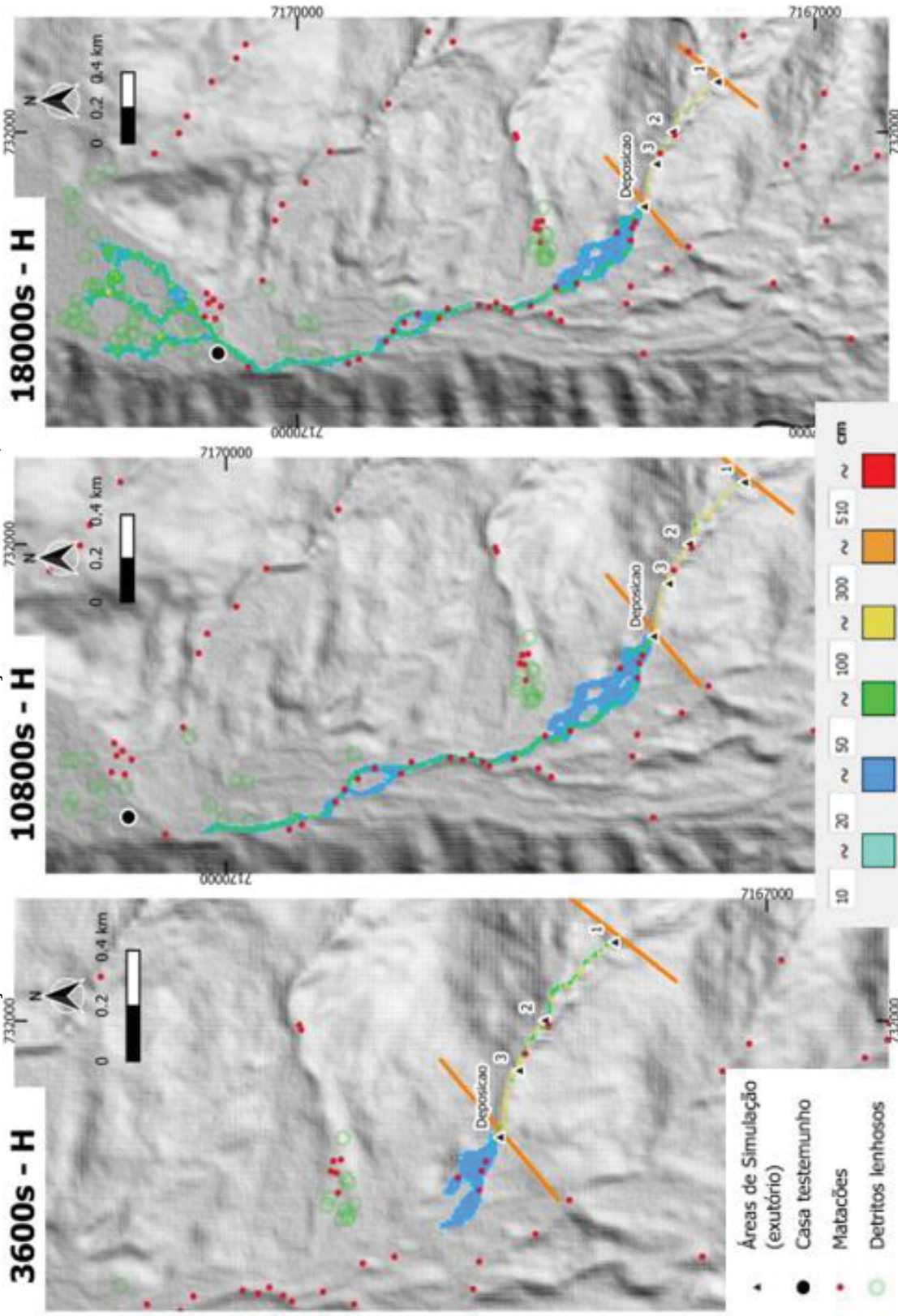
FONTE: A AUTORA (2021)

No que tange aos parâmetros analisados na calibração, observou-se grande sensibilidade do modelo aos parâmetros de tamanho de sedimento e profundidade mínima de fluxo. Esta informação corrobora em parte o estudo realizado por Paixão et al. (2021) segundo o qual os parâmetros que desencadeiam maior sensibilidade no modelo são: ângulo interno de fricção, diâmetro do sedimento e densidade do material do leito.

Os resultados da simulação final realizada para a subárea 3 permitem observar que o fluxo gerado na bacia do rio Gigante alcançou aproximadamente 3,68 quilômetros chegando até região próxima a da casa testemunho e a jusante dela, com uma altura de fluxo (H) no intervalo entre 1 e 3 metros nesse ponto. Apesar disso, o fluxo oriundo dessa sub-bacia de forma isolada não se espalhou pela planície e não seria suficiente para produzir a altura de fluxo observada dentro e fora da casa, ou sequer para atingí-la, pois há um desnível significativo entre o canal fluvial e a casa que a isola como um divisor de águas. A espessura dos depósitos (ZS) apresentou extensão de 1,93 quilômetros com depósitos de até 50 centímetros a essa distância, demonstrando que o mesmo o material mais grosso teve capacidade de mobilidade por uma longa distância.

A área de escavação 1D, diante da consideração de grandes blocos na modelagem, também ficou permeada por depósitos de grande espessura, como observa-se na FIGURA 61.

FIGURA 58 - RESULTADOS DE FORÇA DO FLUXO PARA A SIMULAÇÃO FINAL DA ÁREA 3, PARA A VARIÁVEL H EM 3 PASSOS DE TEMPO.



FONTE: A AUTORA (2021).

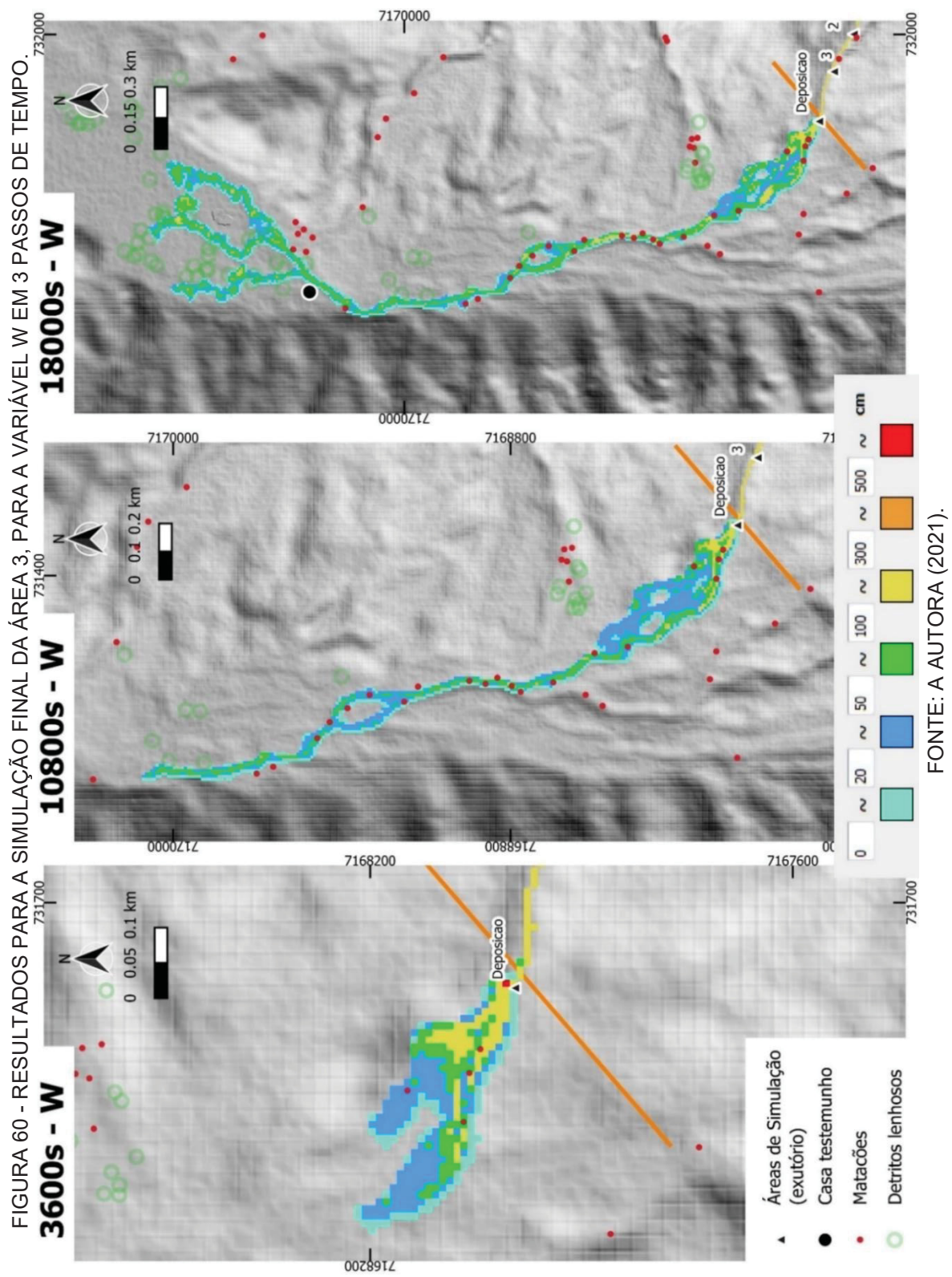
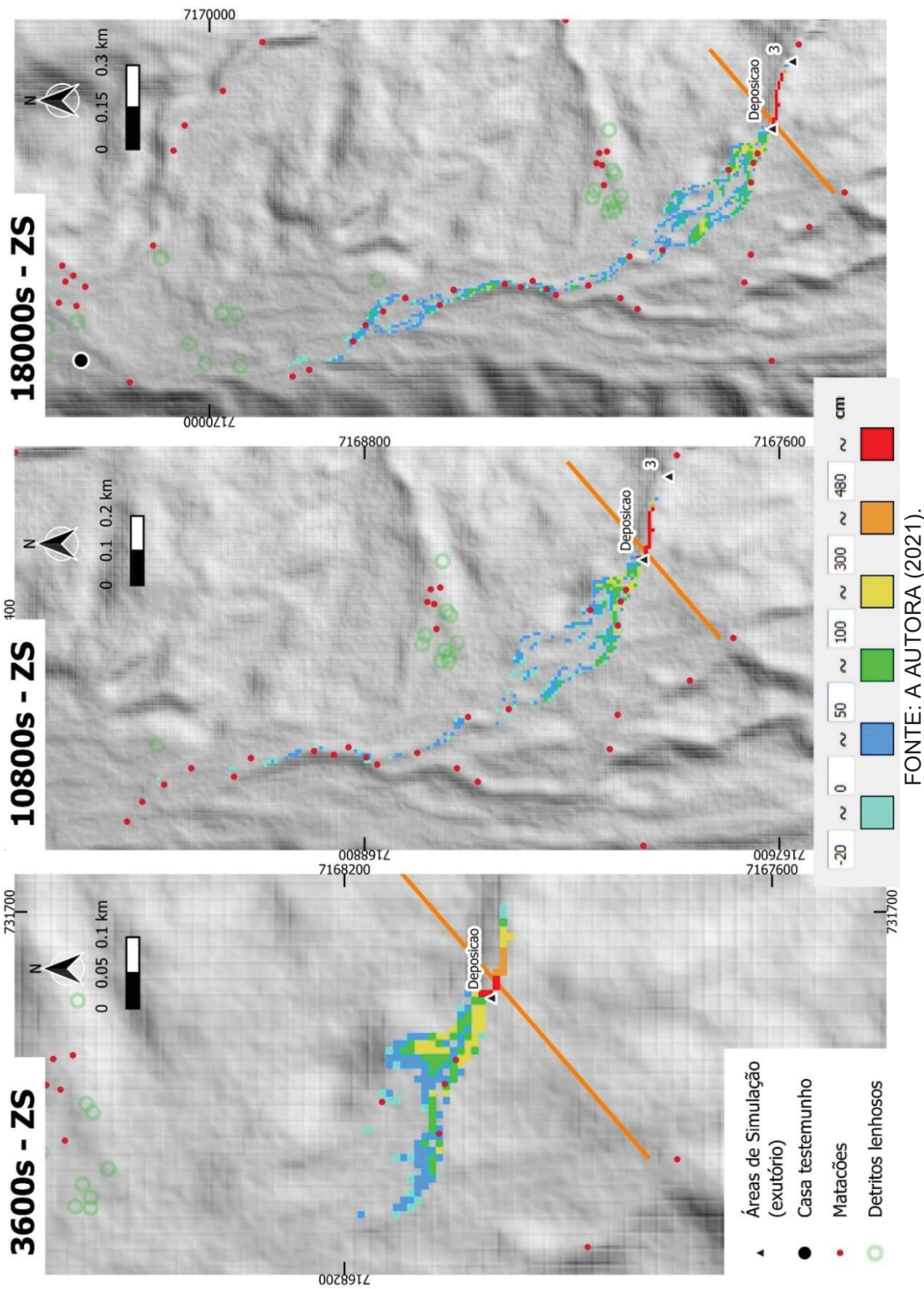


FIGURA 61 - RESULTADOS DE ESPESSURA DO DEPÓSITO PARA ÁREA 3, PARA A VARIÁVEL ZS EM 3 PASSOS DE TEMPO.



Este aspecto não é foco deste estudo, porém pode ser explorado por meio do modelo Kanako conforme observa-se em Kobiyama e Michel (2019). De toda forma, a impossibilidade de simulação sub-bacias diversas de forma simultânea permitiria apenas uma noção aproximada deste efeito de remanso no contexto da bacia como um todo durante o evento, limitação também pontuada por Nakatani et al. (2014). Foi possível identificar por meio dos mapeamentos e modelagem, a mudança de padrão de drenagem nas vertentes da porção leste da bacia, do sentido SE-NW para o sentido E-NW. Somada à suavização da declividade nestas porções, é grande a possibilidade de que este seja o contorno de uma área de depósitos de talus e colúvios originados em momentos pretéritos, tal como observa-se na feição tracejada da Figura 62.

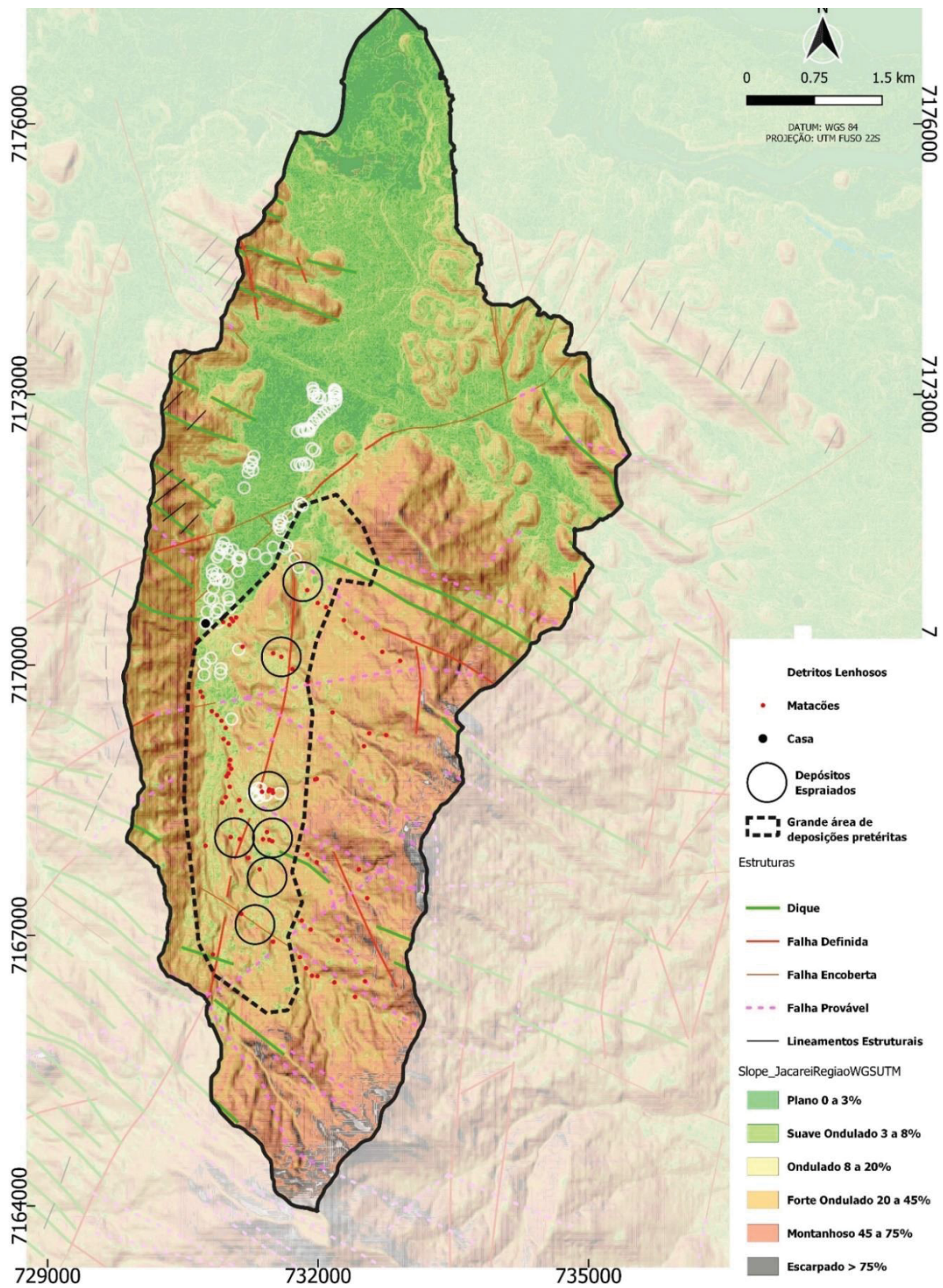
Nesta área de depósitos pretéritos concentra-se a maioria dos matacões de tamanho médio transportados neste evento. Os poucos matacões de tamanho maior nessa área aparentemente passaram por processo de exumação e não de transporte, tendo sido transportadas em eventos anteriores. Conforme observa-se na Figura 62 existência de uma falha em sentido SWS-NNE exatamente sob esta região indica uma tendência de agradação que pode ter estimulado a ocorrência de depósitos de talus e colúvios nesta porção da bacia.

Em relação à vegetação, a distribuição dos detritos lenhosos mapeada não se restringiu a canais principais de fluxo, o que confirma seu transporte por flutuação no momento da inundação da planície. Isto também é confirmado pela concentração desse tipo de detrito na região da ponte da BR 277, que pode ter causado um efeito de represamento.

Conforme indicam estudos de caso utilizando a modelagem com versões do modelo Kanako, ele tem aplicabilidade no estudo de ações preventivas e mitigadoras, por meio da definição de rotas preferenciais de fluxo, da simulação do comportamento de barragens com previsão de rompimento, ou da simulação considerando a existência de reservatórios voltados à interferência no trânsito dos fluxos (LIU, 2012; NAKATANI et al., 2014; NAKATANI et al., 2016; MICHEL et al., 2017).

O estudo da influência destas medidas no contexto da bacia do rio Jacareí pode ser realizado como continuidade deste trabalho, uma vez que nele demonstrou-se a aplicabilidade do modelo Kanako para a região, servindo diretamente a propósitos de planejamento territorial e gestão de risco de desastres neste local.

FIGURA 62 – MAPA DE FEIÇÕES RELEVANTES E DECLIVIDADE



FONTE: A AUTORA (2021).

6.4 CONCLUSÕES

Duas limitações importantes foram observadas na aplicação do modelo à área de estudo; elas são: o limite de tempo de simulação, que motivou a construção de hidrogramas de no máximo 27000 s, tornando impossível a simulação do evento de chuva tal como delimitado no capítulo 3; e a impossibilidade de simulação simultânea de mais de uma sub-bacia, o que impede uma compreensão mais factível da importância do aporte simultâneo das sub-bacias observadas.

De acordo com a modelagem, a precipitação observada foi suficiente para gerar escavação e deposição na bacia do rio Gigante, restringindo-se ao canal principal do rio Jacareí já na planície, sem inundá-la completamente. Isto revela que também foram essenciais as contribuições de escoamento e vazão das bacias a montante e da bacia do rio Tingidor para o alto grau de dispersão e alcance do fluxo pela planície.

Em relação ao material movimentado nas encostas, conclui-se que o modelo representa satisfatoriamente estes aspectos, entretanto, são relevantes estudos de campo para diferenciação entre matacões movimentados e matacões exumados, o que traria possivelmente maior assertividade para a calibração baseada em feições. Ainda, observou-se que a complexidade de manejo do modelo e a dependência de dados de alta qualidade são desafios que se apresentam ao uso operacional do Hyper Kanako no Brasil. Estes desafios, entretanto, podem ser contornados com investimentos em treinamento e na expansão do monitoramento e do levantamento de dados nas regiões montanhosas e florestadas.

Recomenda-se ainda, que antes de ser indicado para uso operacional na região, sejam aplicados e testados outros métodos de calibração.

Juntamente com as partes não escorregadas a montante, verificou-se que ainda existe disponibilidade de material para a ocorrência de novos fluxos de detritos, o que indica que estudos, levantamentos e extensivo monitoramento devem ser realizados na bacia, pensando também no cenário de agravamento das intensidades de precipitação. Outras aplicações do modelo Hyper Kanako também devem ser exploradas, especialmente no planejamento de ações de mitigação e prevenção.

7. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Mesmo diante do contexto de suscetibilidade intrínseca a movimentos gravitacionais de massa na bacia do rio Jacareí, os fluxos de detritos não são registrados com frequência na região, conforme observado em registros da Defesa Civil. Apesar de possíveis erros de identificação do fenômeno por parte de observadores não especializados, um evento da magnitude e do alcance do que ocorreu em 2011 nunca havia sido registrado ou observado pela população. Esta excepcionalidade foi comprovada quantitativamente neste trabalho a partir da descrição das condições meteorológicas da bacia do rio Jacareí naquele contexto, em resolução horária e frente aos dados históricos.

No que tange aos aspectos meteorológicos apresentados no capítulo 3, os resultados deste estudo motivam a realização de estudos posteriores e a intensificação do monitoramento acerca de três questões principais na região: a importância da umidade antecedente - na temporada de chuvas e nos dias anteriores - para a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa; a importância da avaliação da concorrência de sistemas atmosféricos distintos atuando sobre uma mesma região; e a influência da orografia para os eventos pluviométricos.

Quanto à modelagem de fluxo de detritos, ela avançou consideravelmente nos últimos anos, permitindo que estimativas de alcance, volume, forma e trajetória sejam mais acuradas. Por meio do modelo Hyper Kanako é possível simular a ocorrência de fluxos de detritos mediante a construção de um hidrograma de evento. Associado a um bom levantamento de dados sobre a área de estudo, este modelo revela-se assertivo e com potencial para contribuir com a gestão territorial na região da Serra do Mar. O acoplamento da interface do modelo ao software QGIS nesta versão facilitou a análise da distribuição espacial do fluxo e dos depósitos.

De toda forma, os mapeamentos e as simulações corroboram os estudos já realizados no local em que se destaca a propensão da bacia à ocorrência de fluxos de detritos, e a disponibilidade para a ocorrência de novos eventos. Somado às tendências de intensificação dos eventos pluviométricos extremos, o cenário de suscetibilidade da bacia se agrava. Diante disso, as tendências de ocupação do local tornam-se muito relevantes considerando que determinados usos mais extensivos como a pecuária e a silvicultura podem interferir sobre o escoamento, a degradação e a estabilidade das encostas, com impactos sobre a dinâmica hidrogeomorfológica

local. Estes fatores são importantes também pela relação que podem apresentar com a expansão da ocupação permanente na bacia sobre áreas já descritas como suscetíveis a MGMs, o que culmina na acentuação ou na criação de novas situações de risco de desastre. Em toda a extensão da Serra do Mar brasileira e em especial nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo a expansão sobre áreas suscetíveis a desastres deste tipo resulta na ampliação de danos e mortes na época de chuvas, que acometem principalmente uma população socioeconomicamente vulnerável. Com um padrão de ocupação distinto, a bacia hidrográfica do rio Jacareí não apresentou impactos à vida na dimensão em que ocorrem nos estados mencionados em 2011. Faz-se relevante, por tanto, disciplinar a ocupação neste sentido, buscando aproveitar o conhecimento sobre a suscetibilidade e as trajetórias de fluxo apresentados neste trabalho e nos outros já existentes acerca da região.

O presente estudo buscou determinar e avaliar a excepcionalidade e a magnitude da precipitação em associação com a modelagem de fenômenos hidrogeomorfológicos. Observou-se que a realização dessas duas investigações em conjunto dá coerência de contexto sistêmico e aproxima a modelagem da realidade da bacia, também por meio da utilização de dados de eventos já ocorridos. A modelagem por meio das ferramentas utilizadas demonstrou-se viável no âmbito da pesquisa e menos passível de utilização em âmbito operacional, o que seria possível apenas mediante o treinamento acerca deste uso. Entretanto, o acoplamento dos métodos empregados para chuva e para o fluxo de detritos em uma mesma plataforma viabilizaria o uso por um público mais amplo, que em geral caracteriza os que trabalham na gestão de risco de desastre, especialmente em nível municipal. Contribuiriam também neste aspecto a tradução dos softwares e a homogeneização no padrão de inserção de dados. Com estas modificações ferramentais, os métodos empregados têm potencial para utilização no cotidiano de monitoramento na Serra do Mar paranaense.

Em ambas as frentes de análise – precipitação e fluxo de detritos, revelou-se importante a qualidade e a resolução do levantamento de dados para os resultados da modelagem, o que destaca a importância do desenvolvimento de pesquisas, de levantamentos de detalhe e do monitoramento no local. Dessa forma, a modelagem de fluxo de detritos constitui uma ferramenta importante para o gerenciamento de risco e para o planejamento territorial de áreas de risco de desastre.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A.N. Contribuição à geomorfologia do litoral paulista. Revista Brasileira de Geografia. N. 1. Ano XVII. 1955.

AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS (AEN). Equipes avaliam retirada de madeira do leito do rio Jacaré, em Morretes. Disponível em: <http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=64742>. Acesso em Jan/2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Série Histórica da estação Colônia Santa Cruz. Disponível em: HidroWeb v.2.0.0.0: Sistemas de Informações Hidrológicas. Brasília-DF, 2018.

AGUASPARANÁ - Instituto das Águas do Paraná. Série diária da Estação Colônia Santa Cruz. Sistemas de Informações Hidrológicas. 2019.

ALERTA RIO - Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro. Termos Meteorológicos. 2021. Disponível em: <http://www.sistema-alerta-rio.com.br/previsao-do-tempo/termosmet/>. Acesso em: Outubro de 2020.

ALMEIDA, F.F.M.; CARNEIRO, C.D.R. Origem e Evolução da Serra do Mar. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 28. 1998.

AMBRIZZI, T.; REBOITA, M.S.; ROCHA, R.P.; LLOPART, M. The stage of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. Annals of the New York Academy of Sciences. Vol. 1436. 2018.

ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D.; AMORIM, M. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. Environmental Research Letters. N. 11. 2016.

BERNARDINO, B.S.; VASCONCELLOS, F.C.; NUNES, A.M.B. Impact of the equatorial Pacific and South Atlantic SST anomalies on extremes in austral summer precipitation over Grande River basin in Southeast Brazil. International Journal of Climatology. V. 38. 2018.

BIGARELLA, J.J. Contribuição ao estudo da planície litorânea do Estado do Paraná. Brazilian Archives of Biology and Technology. Jubilee Volume. Brazil, 2001.

BIGARELLA, J.J.; MOUSINHO, M.R.; SILVA, J.X. Pediplanos, Pedimentos e seus Depósitos Correlativos no Brasil. Espaço Aberto, V.6, N.2. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016. (1964)

BRASIL. Ministério da Integração. Classificação e Codificação Brasileira de Desastres. 2012.

BRUMMER, C. J. Influence of mass wasting on bed-surface armoring, lag formation, and sediment storage in mountain drainage basins of western Washington State. Thesis. University of Washington Graduate School. 2006.

BUENO, K.E.M. Aplicação do índice RDE para identificar regiões de deposição de fluxos de detritos na bacia do rio Jacareí – Serra do Mar Paranaense. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Brasília-DF, 2015.

CARDOSO, C.S.; QUADRO, M.F.K.; BONETTI, C. Persistência e Abrangência dos Eventos Extremos de Precipitação no Sul do Brasil: Variabilidade Espacial e Padrões Atmosféricos. Revista Brasileira de Meteorologia. V. 35 N. 2. 2020.

CHOU, S.C. Modelo regional ETA. Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática. 1996.

COIMBRA, A. L. Mecânica dos fluidos. E-papers, 1 ed. Rio de Janeiro, 2015.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1, 336.2013.

COSTA, J.; WIECZOREK, G. F. Debris flow/avalanches: Process, recognition, and mitigation. Vol. 7. Geological Society of America, 1987.

CPTEC - INPE. Cartas sinóticas de altitude, período entre 08 e 14 de março de 2011. 2019.

CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Boletim Meteorológico do dia 11 de março de 2011. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: Setembro de 2020.

CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Cartas Sinóticas de Altitude e de Superfície do período entre 8 de março de 2011 às 21 horas e o dia 14 de março de 2011 15 horas. 2020. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: Agosto de 2021.

CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. EM-DAT: The Emergency Events Database - Université catholique de Louvain (UCL) - Disponível em: www.emdat.be, Brussels, Belgium. Acesso em Março de 2020.

CRUZ, O. Contribuição geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar. Revista do Instituto de Geografia. 8-10. p. 9-20. São Paulo, 1990.

DC - PR - Defesa Civil do Paraná. Relatórios de ocorrências de movimentos gravitacionais de massa. 2019.

DE MARTONNE, E. Problemas morfológicos do Brasil Tropical Atlântico. Revista Brasileira de Geografia. Ano V. N. 4. 1943.

DE MELLO, Y. R.; LOPES, F. C. A.; ROSEGHINI, W. F. F. Características climáticas e análise rítmica aplicada a episódios extremos de precipitação e temperatura no município de Paranaguá, PR. Revista Brasileira de Climatologia, v. 20, 2017.

DE LIMA FRICK, E.D.C. Identificação de diferentes estágios sucessionais e idade da floresta: abordagens do sensoriamento remoto. Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, 15(2). 2019.

DIAS, V. C.; VIEIRA, B. C. Parâmetros morfométricos e corridas de detritos: índice de suscetibilidade e magnitude de bacias hidrográficas na Serra do Mar. GEOUSP, 26. 2022.

DE PLOEY, J.; CRUZ, O. "Landslides in the serra do mar, Brazil." Catena 6, no. 2: 111-122. 1979.

EPA - Environment Protection Agency of the United States of America. Climate Change Indicators: Heavy Precipitation. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heavy-precipitation>. Acesso em Julho de 2020.

FOLADOR, R. M.; SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P. Cálculo da Probabilidade e Quantificação do Volume de Material Suscetível a Escorregamentos – Bacia do Rio Jacareí, Morretes – PR. Boletim Paranaense de Geociências, 74-1, p.47-56, 2018.

FRANCK, A. G.; DE GUSMÃO, J. S.; KOBAYAMA, M. Avaliação da influência da resolução do modelo digital de terreno na modelagem numérica de escorregamentos e fluxo de detritos. Revista Geonorte, 12(40), 1-23. 2021.

GARREAUD, R. D.; ACEITUNO, P. Atmospheric circulation over South America: mean features and variability. The physical geography of South America. Oxford University Press, Oxford, England, 2007.

GOERL, R.F.; KOBAYAMA, M., SANTOS, I. Hidrogeomorfologia: princípios, processos e aplicações. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.13, n.2, 2012.

GOSWAMI, B. Multiscale interaction with topography and extreme rainfall events in the northeast Indian region. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 115, n. D12, 2010.

GRIMM, A. M. Madden–Julian Oscillation impacts on South American summer monsoon season: precipitation anomalies, extreme events, teleconnections, and role in the MJO cycle. Climate Dynamics, v. 53, n. 1, p. 907-932, 2019.

GUIJARRO, J.A. "climatol" R Package. Version 3.1.2. 2019

HADER, P. The escalation of extreme rainfall events in Brazil. In: Natural Hazards. EGU Blogs, 2020. Disponível em: <https://blogs.egu.eu/divisions/nh/2021/02/22/2020-the-escalation-of-extreme-rainfall-events-in-brazil/>. Acesso em Junho/2021.

HARVEY, C.; CONNOR, J. History of the Application of Design Storm Frequency and Intensity. World Environmental and Water Resources Congress 2017.

HASTIE, T. J.; TIBSHIRANI., R. J. Generalized additive models." Monographs on statistics and applied probability 43 (8): 335. 1990.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; NETO, M.C.C.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J.; JANASI, V.A. Província Mantiqueira. In.: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; NEVES, B.B.B. Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. [S.l: s.n.], 2004.

HORIUCHI, S.; IWANAMI, E.; NAKATANI, K.; SATOFUKA, Y; MIZUYAMA. Development of "Hyper Kanako", a debris flow simulation system using with laser profiler data. 2012.

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. Water resources research, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967.

HUNGR, O.; EVANS, S.G.; BOVIS, M.; HUTCHINSON, J.N. A review of the classification of landslides of the flow type. Environmental & Engineering Geoscience, v. VII, n. 3, P. 221-238, 2001.

HÜRLIMANN, M.; COVIELLO, V.; BEL, C.; GUO, X.; BERTI, M.; GRAF, C.; HÜBL, J.; MIYATA, S.; SMITH, J.B.; YIN, H.Y. Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. Earth-Science Reviews, 199, p.102981. 2019.

IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná. Atlas Climático do Paraná. 2019. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=595>. Acesso em Fev/2020.

IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná. Normais climatológicas para o estado do Paraná. Atlas Climatológico do Estado do Paraná. Acesso em Outubro de 2019.

IAPAR. Mapa Climatológico do Estado do Paraná. 2019. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=595>. Acesso em Maio/2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas de População 2020. Disponível em:

https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2020/POP2020_20210331.pdf. Acesso em Maio de 2021.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Série Histórica Horária da Estação Morretes A-873. 2019.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Série Histórica Horária da Estação Morretes. 2019.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagens do satélite geoestacionário EUMETSAT do período de 07 a 12 de março de 2011. Acervo de imagens anteriores. Disponíveis em: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>. Acesso em Janeiro de 2011.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Imagens do satélite geoestacionário GOES 12 do período de 07 a 12 de março de 2011. Acervo de imagens anteriores. Disponíveis em: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>. Acesso em Janeiro de 2011.

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Classificação de intensidade da precipitação líquida. 2021. Disponível em: https://www.ipma.pt/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faqdetail.html?f=/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faq_0033.html. Acesso em: Outubro de 2020.

ITCG – Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. Clima – Estado do Paraná (SIMEPAR). Disponível em: http://www.itcg.pr.gov.br/arquivos/File/Produtos_DGEO/Mapas_ITCG/PDF/Mapa_Climas_A3.pdf. Curitiba-PR, 2006.

IVERSON, R.M. The debris-flow rheology myth. In.: RICKENMANN AND CHEN (Eds.) Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment. Rotterdam: Milpress, 2003.

IVERSON, R.M. The Physics of Debris Flows. Reviews of Geophysics, 35, 3. p. 245-296. American Geophysical Union. 1997.

IVERSON, R.M.; REID, M.E.; LAHUSEN, R.G. Debris flow mobilization from landslides. In.: Annual Ver. Earth Planet. 25. p. 85-138, 1997.

JAKOB, M.; HUNGR, O. Debris-flow hazards and related phenomena. New York: Springer, 2005.

JUNQUAS, C.; LI, L.; VERA, C. S.; LE TREUT, H.; TAKAHASHI, K. Influence of South America orography on summertime precipitation in Southeastern South America. *Climate Dynamics*, v. 46, n. 11, p. 3941-3963, 2016.

KANG, Y.; PENG, X.; WANG, S.; DONG, C.; SHANG, K.; ZHAO, Y. Statistical characteristics and synoptic situations of long-duration heavy rainfall events over North China. *Earth and Space Science*, v. 7, n. 5, p. e2019EA000923, 2020.

KIRPICH, Z.P. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Journal of Civil Engineering*. 10(6): 362.

KOBIYAMA, M., CAMPAGNOLO, K., & GOERL, R. F. A hidrogeomorfologia como ferramenta para popularizacao e desenvolvimento de SABO no Brasil. *Revista Geografica Academica*, 15(2), 5-25. 2021.

KOBIYAMA, M.; MICHEL, R.D.L. Debris-flow hazard investigation with Kanako-2D in a rural basin, Alto Feliz municipality (Brazil). In.: 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation. 2019.

KOUTSOYIANNIS, D., 2003, October. On the appropriateness of the Gumbel distribution for modelling extreme rainfall. In *Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop held at Bologna* (pp. 24-25).

LIN, Y.; CHIAO, S.; WANG, T.A.; KAPLAN, M.L.; WEGLARZ, R.P. Some common ingredients for heavy orographic rainfall. *Weather and forecasting*, v. 16, n. 6, p. 633-660, 2001.

LIMA, I.F., FERNANDES, N.F.; JUNIOR, E.D.A.V. Análise morfométrica em bacias afetadas por fluxos de detritos na região serrana do rio de janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21(2). 2020.

LISTO, F.D.L.R.; NERY, T.D. Corridas de massa e escorregamentos translacionais na Serra do Mar Paulista: índices morfométricos e modelo TRIGRS. *Derbyana*, 43, pp.e757-e757. 2022.

LIU, J., NAKATANI, K.; MIZUYAMA, T. Hazard mitigation planning for debris flow based on numerical simulation using Kanako simulator. *Journal of Mountain Science*, 9(4), pp.529-537. 2012.

LOPES, A.B.; TANAKA, H.S.; PICANÇO, J. Caracterização de perfil de solo na sub-bacia do rio Santa Cruz – Paranaguá (PR), para análise suscetibilidade para fluxos de detritos na área. In: XXIII Congresso de Iniciação Científica da Unicamp, Campinas-SP, 2015.

LOPES, F.C.A. Espessura do solo e forma da vertente como condições de contorno na instabilidade de encosta. Tese de doutoramento apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia. Curitiba: UFPR, 2019.

MAACK, R. (1968) Geografia Física do Estado do Paraná. 4 ed. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2012.

MAACK, R. Geografia física do Estado do Paraná. 1968. Editora UEPG. Ponta Grossa - PR, 2002.

MARTINS, T.D.; CARVALHO, V.B.; EDUARDO, B.J.; BATEIRA, C. Implicações da resolução do MDT na modelagem de instabilidade de vertentes. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia*, (47). 2020.

MARTINS, A.; FERREIRA, M.B.P.; PONTONI, D.R.; BATISTA, A.H.; PASSOS, E. Descrição da compartimentação de processos de movimento de massa na Serra da Prata em Morretes – PR. In: IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, Rio de Janeiro-RJ, 2012.

MAIDMENT, D. R. Handbook of hydrology. No. 631.587. McGraw-Hill, 1993.

MELO, L.L.; MESQUITA, M.; PICANÇO, J. O estudo do regolito na sub-bacia do Córrego do Gigante (Morretes, PR): subsídios para a análise de nucleação de debris

flows. In: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Bento Gonçalves-RS, 2015.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. Riv. Meteor. Aeronautica, 44, 195-202, 1984.

MINEROPAR – Minerais do Paraná. Atlas geomorfológico do Estado do Paraná. Escala base, v. 1, n. 250.000, 2006.

MINEROPAR. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Paraná. Curitiba: MINEROPAR, 2014.

MINEROPAR. Levantamento por radar interferométrico para o litoral do Paraná. Curitiba: MINEROPAR, 2015.

MINEROPAR. Mapeamento Geológico do Estado do Paraná. Curitiba: MINEROPAR, 2006.

MINEROPAR. Painel Serra do Mar – Sítio Geológico. Curitiba: MINEROPAR, 2006.

MONTINI, T.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. The South American Low-Level Jet: A New Climatology, Variability, and Changes. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. AGU. 124, 1200-1218. 2019.

MULVANEY, T. J. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. Proceedings of the institution of Civil Engineers of Ireland, 4, 19-31. 1851.

NAGL, G.; HÜBL, J.; KAITNA, R. Velocity profiles and basal stress in natural debris flow. Earth surface processes and landforms, 45, p. 1764 – 1776, 2020.

NAKATANI, K.; IWANAMI, E.; HORIUCHI, S.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Development of "Hyper Kanako", a debris flow simulation system based on laser profile data. In: 12th Congress INTERPRAEVENT. France: 2012.

NAKATANI, K.; WADA, T.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Development of "Kanako 2D (Ver.2.00)," a user-friendly one- and two-dimensional debris flow simulator

equipped with a graphical user interface. *International Journal of Erosion Control Engineering*, v. 1, n. 2, p. 62-72, 2008.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua {Dataset Name} Data; NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA.

NASCIMENTO, L.; RODRIGUES SILVESTRE, M.; SANT'ANNA NETO, J. L. Trends and rainfall tropicalization in Paraná State, south of Brazil. *Atmosfera*, v. 33, n. 1, 2020.

OLIVEIRA, L.Z.; KLITZKE, A.R.; FANTINI, A.C.; ULLER, H.F.; CORREIA, J.; VIBRANS, A.C. Robust volumetric models for supporting the management of secondary forest stands in the Southern Brazilian Atlantic Forest. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90, pp.3729-3744, 2018.

OUYANG, C.; WANG, Z.; AN, H.; LIU, X.; WANG, D. An example of a hazard and risk assessment for debris flows—A case study of Niwan Gully, Wudu, China. *Engineering Geology*, 263, p.105351. 2019.

PAIXÃO, M.A.; KOBAYAMA, M. Sediment effect on debris flow runout area: case study of Böni watershed, Serra Gaúcha. *Ciência e Natura*. Vol. 39 n. 2. 2017.

PARANÁ. Mapa Geológico. Estudo de Impacto Ambiental das Obras de Ampliação e Modernização da Estrutura Portuária da Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina. APPA – Administração dos portos de Paranaguá e Antonina, 2004.

PICANÇO, J.; MESQUITA, M.J.; STURION, F.; CARDOSO, V. Análise de suscetibilidade para debris flows na sub-bacia do ribeirão Tingidor (Morretes, PR). In: 9º Simpósio Nacional de Cartografia Geotécnica, UFMT, Cuiabá-MT, 2015.

PINTO, R.C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S.C. Classificação dos movimentos de massa ocorridos em março de 2011 na Serra da Prata, estado do Paraná. *Geoinf: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Maringá*, v.4, n.1, p. 3-27, 2012.

PINTO, R.C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S.C. Mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa com uso da Avaliação Multicritério pelo método da Média Ponderada Ordenada. *Caderno de Geografia*, v.25, n.43, 2015.

PINTO, R.C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S.C. Movimentos de massa como processos naturais de evolução das encostas, estudo de caso: bacia do rio Jacareí, municípios de Morretes e Paranaguá-PR. *Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Maringá*, v.6, n.1, p. 23*45, 2014.

PROTECCION CIVIL DE ESPAÑA. Lluvias Fuertes. 2020. Disponível em: <https://www.proteccioncivil.es/coordinacion/gestion-de-riesgos/meteorologicos/lluvias-intensas>. Acesso em Outubro de 2020.

QUADROS, L. E.; MELLO, E. L.; GOMES, B. M.; ARAÚJO, F. C. Rainfall trends for the State of Paraná: present and future climate. *Ambiente e Água*. Vol. 14. N. 2. 2019.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. D.; AMBRIZZI, T. Precipitation regimes in South America: a bibliography review. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2), 185-204. 2010.

REGOTO, P.; DERECHYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELLA, A.C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*, 2021.

REID, M. E.; LAHUSEN, R. G.; IVERSON, R. Debris-flow initiation experiments using diverse hydrologic triggers. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, p. 1-11, 1997.

RICHITT, L.A.; KOBAYAMA, M.; SILVA, R.V. Uma revisão de modelos computacionais (softwares) para simulação de fluxo de detritos. In: *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Florianópolis: 2017.

RODRIGUES, R.R.; WOOLLINGS, T. Impact of atmospheric blocking on South America in Austral Summer. *Journal of Climate*. V. 30. 2016.

SALGADO, A.A.R.; SANTOS, L.J.C.; PAISANI, J.C. *The Physical Geography of Brazil – Environmental, Vegetation and Landscape*. Switzerland: Springer, 2019.

SANTOS, I. Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica. Florianópolis: UFSC/CFH/GCN, 167f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SATO, L.L.; PICANÇO, J. Inventário dos escorregamentos na Serra da Prata (PR) no evento hidrológico de 12/03/2011. In: XXV Congresso de Iniciação Científica da Unicamp, Campinas-SP, 2017.

SCHEER, M.B.; MOCOCHINSKI, A.Y.; RODERJAN, C.V. Estrutura arbórea da Floresta Ombrófila Densa Altomontana de serras do sul do Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 25, pp.735-750. 2011.

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

SIDLE, R.C. New concepts in Hydrogeomorphic processes across various scales of space and time. *Transactions, Japanese Geo-morphological Union*, V.25, N. 4, 2004.

SIDLE, R.C.; ONDA, Y. Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. *Hydrological Processes*, n. 18, 2004.

SILVA, J. P.; SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P. Aplicação de dois métodos físico-matemáticos para avaliação do índice de estabilidade das vertentes da bacia do rio Ribeirão/Paranaguá-PR. *Revista Geonorte, Edição Especial*, V.2, N.4, p.1291-1302, 2012.

SILVA, V.; FAGUNDES, M.C.V.; LIMA, M.R.; LIMA, V.C.; TAVARES, A.K. Conhecendo os principais solos do litoral do Paraná. *Matinhos-PR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 2013.

SILVEIRA, C. T. et al. Análise do Fator de Segurança da estabilidade das vertentes na bacia do rio Jacareí, Serra do Mar Paranaense. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n. 3, p. 287-297, 2012.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; FERREIRA, A.M.; DE GÓIS, J.R.; DE MIO, G.; SILVEIRA, R.M.P.; BASSI, N.E.M.; LEONARDI, T.M.H. Emprego de atributos

topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacareí, Paraná. *Sociedade & Natureza*, vol. 25, núm. 3, Uberlândia, pp. 623-639, 2013.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; FERREIRA, A.M.; FELIPE, R.S.; KEPEL FILHO, J.L.; FOLADOR, R.M.; COSTA, L.C. Análise do fator de segurança da estabilidade das vertentes na bacia do rio Jacareí, Serra do Mar paranaense. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, UGB, v.13, n. 3, p.287-297, 2012.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; FERREIRA, A.M.; ZAI, C.; SILVEIRA, R.M.P.; MASSULINI, N.E.B.; LEONARDI, T.; KEPEL FILHO, J.L. Mapeamento de suscetibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacareí, estado do Paraná. In: IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, Rio de Janeiro-RJ, 2012.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S.M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar paranaense apoiado na análise digital do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, UGB, v.15, n.1, 2014.

SIMEPAR - Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná, ITCG - Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. Mapa de Clima do Paraná. Disponível em: http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mapa_climas_a3.pdf. Acesso em Março de 2021.

SMITH, R. B.; EVANS, J. P. Orographic precipitation and water vapor fractionation over the southern Andes. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, n. 1, p. 3-19, 2007.

SMITH, Ronald B. Progress on the theory of orographic precipitation. *Special Papers-Geological Society Of America*, v. 398, p. 1, 2006.

SOUZA JR, C. M., Z. SHIMBO, J., ROSA, M. R., PARENTE, L. L., A. ALENCAR, A., RUDORFF, B. F., AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, 12(17), 2735. 2020.

STURION, F.O. Caracterização dos fluxos gravitacionais de massa no bairro floresta (Morretes, PR) durante a megacatastrofe de março/2011. 83 pgs. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas-SP, 2013.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. The role of neotectonics in the evolution of the Brazilian Coast. *Genomos*, Vol. 4, N. 2. 1996.

TAKAHASHI, T. Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures. 1 Ed. Taylor & Francis, 280 London; New York. 2007.

TAKAHASHI, T. Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures. 2 Ed. Taylor & Francis, 280 London; New York. 2014.

TAKAHASHI, T.; NAKAGAWA, H. Prediction of stony debris flow induced by severe rainfall. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, v. 44, n. 3, p. 12-19, 1991.

TANAKA, H.S.; COSTA, V.V.; PICANÇO, J.; LUIZ, E.F.O.; LOPES, A.B.B. Caracterização da suscetibilidade para os fluxos de detritos (debris flows) e fluxos de enchente (debris floods) na sub-bacia do Rio Santa Cruz, Paranaguá- PR, no evento meteorológico de Março de 2011. In: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Bento Gonçalves-RS, 2015.

TAVARES, C.M.G.; FERREIRA, C.C.M. A relação entre a orografia e os eventos extremos de precipitação para o município de Petrópolis. *Revista Brasileira de Climatologia*. Vol. 16. 2020.

TAVARES, R.; MENDONÇA, F. Ritmo climático e ritmo social: pluviosidade e deslizamentos de terra na Serra do Mar – Ubatuba/SP. *Riscos climáticos: Vulnerabilidades e resiliência associados*, 2017.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. Eventos extremos de precipitação na região da Serra do Mar PARTE II: condições meteorológicas de grande escala. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. 2006.

TERASSI, P.M.B.; GALVANI, E. O efeito orográfico da Serra do Mar e o potencial erosivo das chuvas nas bacias hidrográficas do Ribeira e Litorânea-Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 21, 2017.

USGCRP - United States Global Change Research Program. Heavy Precipitation. 2021. Disponível em: <https://www.globalchange.gov/browse/indicators/heavy-precipitation>. Acesso em Julho de 2020.

USGS - United States Geological Service. Imagem Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) dos dias 11 e 12 de março 2011 às 14 horas. Disponíveis em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em Julho de 2019.

VAN NIEKERK, A.; SANDU, I.; VOSPER, S. B. The circulation response to resolved versus parametrized orographic drag over complex mountain terrains. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 10, n. 10, p. 2527-2547, 2018.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. O clima do litoral do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*. Ago, 2008.

VANHONI, Felipe; MENDONÇA, Francisco. O clima do litoral do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 3, 2008.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences. United States. 1978.

VIEIRA, B.C.; GRAMANI, M.F. Serra do Mar: the most "tormented" relief in Brazil. In: *Landscapes and landforms of Brazil*. Springer, Dordrecht, p. 285-297. 2015.

VIEIRA, B.C.; SALGADO, A.A.R.; SANTOS, L.J.C. (EE) *Landscapes and Landforms of Brazil*. World Geomorphological Landscapes. Springer, 2015.

VIEIRA, B.C.; SOUZA, L.M.; ALCALDE, A.L.; DIAS, V.C.; BATEIRA, C.; MARTINS, T.D. Debris flow in Southeastern Brazil. In: *7th Conference on Debris-flow Hazards Management*. 2019.

VILLAÇA-GOMES, M. C. V., Vieira, B. C., Salgado, A. A. R., & Braucher, R. Debris flow and long-term denudation rates in a tropical passive margin escarpment in South America. *Geomorphology*, 413, 108333. 2022.

VILLELA, E.C.; KOBAYAMA, M. Reconstrução e análise de um fluxo de detritos por meio de dados de campo e do modelo Kanako 2D no município de Gaspar-SC. In: *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Foz do Iguaçu-PR, 2019.

WILFORD, D.J.; SAKALS, M.E.; INNES, J.L.; SIDLE, R.C.; BERGERUD, W.A. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, n. 1, p. 61-66, 2004.

WMO - World Meteorological Organization. *Instruments and Observing Methods*. Report nº 84. 2004.

WOOD, S. N. Inference and computation with generalized additive models and their extensions. *Test*, 29(2), 307-339. 2020.

WU, T.H. Effect of vegetation on slope stability. *Transportation Research Record*. 1984.

ZAI, C. GRASSO, L.; SILVEIRA, C.T.; GUARNIERI, D.O. Impactos socioambientais por movimentos de massa na comunidade de floresta, região da Serra do Mar paranaense. *Caminhos de geografia*. V. 18. N. 61. 2017. p. 19-32.