

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

BEATRIZ DA ROSA CARGNIN

**GEOMORFOMETRIA APLICADA À ANÁLISE DA ESTABILIDADE E
MOBILIDADE DOS INTERFLÚVIOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO IBICUÍ E
JACUÍ, SUL DO BRASIL**

PORTO ALEGRE

2024

BEATRIZ DA ROSA CARGNIN

**GEOMORFOMETRIA APLICADA À ANÁLISE DA ESTABILIDADE E
MOBILIDADE DOS INTERFLÚVIOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO IBICUÍ E
JACUÍ, SUL DO BRASIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Orientador: Prof. Dr. Clódís de Oliveira Andrades Filho

Coorientador: Prof. Dr. Fabio Corrêa Alves

PORTO ALEGRE

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Cargnin, Beatriz da Rosa
Geomorfometria aplicada à análise da estabilidade e mobilidade dos interflúvios das bacias hidrográficas do Ibicuí e Jacuí, sul do Brasil / Beatriz da Rosa Cargnin. -- 2024.
82 f.

Orientador: Clódís de Oliveira Andrades-Filho.

Coorientador: Fabio Corrêa Alves.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Drenagem. 2. Modelo digital de elevação. 3. Unidades geomorfológicas. I. Andrades-Filho, Clódís de Oliveira, orient. II. Alves, Fabio Corrêa, coorient. III. Título.

ATA AUTENTICADA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
SENSORIAMENTO REMOTO - Mestrado Acadêmico
Ata de defesa de Dissertação

Aluno: Beatriz da Rosa Cargnin, com ingresso em 13/06/2022

Título: Geomorfometria aplicada à análise da estabilidade e mobilidade dos interflúvios das bacias hidrográficas do Ibicuí e Jacuí, Sul do Brasil

Data: 01/03/2024

Horário: 14:00

Local: CEPSRM

Banca Examinadora	Avaliação	Origem
Claudio Wilson Mendes Junior	Aprovado	UFRGS
Michael Vinicius de Sordi	Aprovado	Externo
Sidnei Luís Bohn Gass	Aprovado	UNIPAMPA

Avaliação Geral da Banca: Aprovado

Data da homologação:

Porto Alegre, 15 de abril de 2024

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Av. Bento Gonçalves, 9500 Prédio 44202 Setor 5 - Bairro Agronomia - Telefone 3308-6221
Porto Alegre - RS

Documento gerado sob autenticação nº UIF.320.291.R35
Pode ser autenticado, na Internet, pela URL <http://www.ufrgs.br/autenticacao>,
tendo validade sem carimbo e assinatura.

Dedico esse trabalho ao meu noivo por todo incentivo e apoio durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente por me guiar, me proteger nesta jornada e iluminar o meu caminho, sempre enviando alguém para me ajudar quando eu estava desesperada. Também agradeço a mim mesma por aguentar tudo e ainda ser linda, simpática, paciente, organizada, saudável, cuidar da casa e do Dobby, ser boa filha, boa noiva, boa aluna, é claro que falho em pelo menos três durante a semana.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de pesquisa. Também Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo espaço de formação e pelas experiências enriquecedoras, oferecidas principalmente no CEPSRM.

Ao meu orientador Prof. Dr. Clódis de Oliveira Andrades Filho por toda paciência e dedicação, sempre disponível para os questionamentos e incentivando a evolução profissional em vários momentos, também a todos os membros do grupo de pesquisa LATITUDE que compartilharam comigo seus conhecimentos. Ao meu Coorientador Prof. Dr. Fabio Corrêa Alves pelas contribuições inestimáveis na construção desse trabalho e em minha formação.

Ao meu amigo Thiago Gomes e prof. Sidnei Gass pelo incentivo a ingressar no PPGSR. Aos colegas do PPGSR que se tornaram amigos nessa jornada me apoiando e auxiliando nesta pesquisa Catherine Vargas, Daniele Ghellar, Morvana Machado, Mateus Reis. Aos demais amigos, colegas, professores, funcionários do PPGSR / CEPSRM, pela convivência diariamente com momentos de descontração ou de auxílio, que participaram, em vários momentos, da construção desse estudo.

Aos meus pais Sonia e Gerson que sempre me apoiaram e incentivaram a não desistir dos meus sonhos, que renunciaram várias coisas em prol dos meus estudos, me ensinando que o conhecimento adquirido ninguém pode nos tirar. Obrigado por vibrarem por cada conquista minha por menor que seja, e o que mais me motiva a continuar é saber que vocês vão se orgulhar. Agradeço também a minha irmã Jenifer por me ouvir desabafar, e colocar minha cabeça no lugar me mostrando que as vezes o problema não é tão grande como estou vendo, que há uma solução. Também a minha sobrinha que alegra os meus dias através das suas videochamadas. Ao meu noivo Uilliam Ramos por me compreender e ter paciência com minha ansiedade e estresse, estar ao meu lado nos meus melhores e piores dias me apoiando e incentivando a continuar.

Você não tem que ser grande para começar,
mas você tem que começar, para ser
grande.

Zig Ziglar

RESUMO

Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são essenciais para estudos que necessitam de dados da morfologia da superfície terrestre, visto que o relevo está em constante mudança. A geomorfometria tem potencial para contribuir na análise de mudanças da morfologia terrestre e evolução da paisagem, que pode ocorrer por alterações resultantes das dinâmicas hidrográficas, estas alterações podem implicar na mobilidade de divisores de drenagem. O movimento ativo de um divisor de drenagem pressupõe que há diferenças nas taxas de erosão entre as bacias que compartilham um mesmo divisor. Sendo assim, muitos indicadores potenciais de estabilidade / mobilidade de divisores são essencialmente indicadores topográficos das taxas de erosão. Nesse sentido, a região oeste do Rio Grande do Sul (RS) possui grande potencial para aplicação de técnicas de detecção da mobilidade de divisores, uma vez que estudos históricos já levantaram a hipótese de processos de captura entre os rios Ibicuí e Jacuí, pertencentes respectivamente, às regiões hidrográficas do Uruguai e do Guaíba. A hipótese do presente estudo é que há instabilidade nas sub-bacias hidrográficas associadas ao interflúvio Ibicuí-Jacuí passíveis de detecção e avaliação destes distúrbios fluviais por geomorfometria. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi analisar a estabilidade e mobilidade de divisores de drenagem nos altos cursos das bacias hidrográficas do Ibicuí e Jacuí no RS a partir do MDE e técnicas de geomorfometria. Para o estudo foi utilizado MDE global COP-30, escolhido diante de avaliação de acurácia vertical e aderência ao Padrão Brasileiro de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) realizada sobre os MDEs SRTM v.3, NASADEM, AW3D30 e o COP-30, discriminadamente pelas unidades geomorfológicas Estado do RS. Assim, os resultados indicam que há um elevado nível de mobilidade dos divisores de drenagem, principalmente na região central da área de estudo, que reúne as seguintes características geográficas predominantes: i) ocorrência dominante da unidade geomorfológica da Depressão Central; ii) predomínio de substrato rochoso sedimentar; iii) ocorrência expressiva de argissolos vermelho; iv) ocorrência relativa de menores altitudes. A direção principal de mobilidade de interflúvio aponta que a bacia do rio Jacuí está avançando em direção a bacia do rio Ibicuí.

Palavras-chave: Drenagem. Modelo digital de elevação. Unidades geomorfológicas.

ABSTRACT

Digital Elevation Models (DEMs) are essential for studies that include data on the morphology of the Earth's surface, as relief is constantly being (re)shaped. Geomorphometry has the potential to contribute to the analysis of changes in terrestrial morphology and landscape evolution, which can occur due to changes resulting from hydrographic dynamics, these changes can imply the mobility of drainage divider. The active movement of drainage divides assumes that there are differences in erosion rates between catchments that share the same divider. As such, many potential indicators of divide stability/mobility are essentially topographic indicators of erosion rates. In this sense, the western region of Rio Grande do Sul (RS) has great potential for applying techniques for detecting the mobility of dividers, since historical studies have already raised the hypothesis of capture processes between the Ibicuí and Jacuí rivers, belonging respectively, to the hydrographic regions of Uruguay and Guaíba. This work has the hypothesis that there is mobility in the hydrographic sub-basins associated with the Ibicuí-Jacuí divide and that the application of geomorphometry can allow the detection and evaluation of these river disturbances. Thus, the general objective of this work was to analyze the stability and mobility of drainage divides in the upper reaches of the Ibicuí and Jacuí river basins in RS using the geomorphometry techniques and MDE. To apply geomorphometry techniques in this study, global MDE COP-30 was used, based on the assessment of vertical accuracy and adherence to the Brazilian Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD) carried out on the MDEs SRTM v.3, NASADEM, AW3D30 and COP-30, within the different geomorphological units of the State of RS. Thus, the results indicate that there is a high level of mobility of drainage divides, mainly in the central region of the study area, which present the following predominant geographic characteristics: i) dominant occurrence of the Central Depression geomorphological unit; ii) predominance of sedimentary rocky substrate; iii) significant occurrence of red argisols; iv) relative occurrence of lower altitudes. The main direction of interfluvial mobility indicates that the Jacuí River basin is advancing towards the Ibicuí River basin.

Keywords: Drainage. Digital elevation model. Geomorphological units.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diferença entre o MDS (linha azul) e o MDT (linha vermelha). Pontos vermelhos representam os pontos de elevação amostrados no terreno.....	22
Figura 2 - Principais componentes da missão SRTM.....	24
Figura 3 - Observação das geometrias do PRISM. A = modo de observação triplo; B = modo de observação estéreo.	25
Figura 4 - A) Esquema da “Lei das Declividades Desiguais” de Gilbert (1877). B) Área de drenagem de referência usada em todas as métricas para calcular diferenças do divisor. C) Funcionamento da direção de mobilidade das métricas estudadas.....	29
Figura 5 - Fluxograma das etapas elementares da pesquisa.	30
Figura 6 - Fluxograma das etapas de processamento para a avaliação da qualidade dos MDEs.....	33
Figura 7 - Unidades geomorfológicas do estado do RS.....	34
Figura 8 - Distribuição espacial das RRRNN nas unidades geomorfológicas do Estado do RS.	39
Figura 9 - Localização das bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Jacuí e o divisor principal estudado.	46
Figura 10 - Fluxograma dos processamentos para a análise de mobilidade e estabilidade dos divisores de drenagem.....	48
Figura 11 - Localização das sub-bacias de 5ª e 4ª ordens e o divisor de drenagem principal, incluindo a distribuição espacial dos principais tipos de rocha desta região.	52
Figura 12 – Unidades geomorfológicas de abrangência do divisor principal de drenagem (bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Jacuí) e as sub-bacias abrangidas pelo recorte espacial de estudo.	54
Figura 13 - Distribuição espacial das sub-bacias hidrográficas de 4ª ordem e suas principais classes de solos.....	55
Figura 14 - Gráfico de barras de erros com os valores médios e de desvio padrão das métricas topográficas extraídas para os divisores de drenagem de 5ª ordem fluvial (divisores 1-24). (a-d) Elevação (a), declividade (b), amplitude (c) e χ (d). Faixas em cinza indicam divisores móveis. Cores azul e vermelho representam os lados de cada divisor de drenagem analisado.....	56

Figura 15 - Síntese do grau de mobilidade dos divisores de drenagem extraídos de sub-bacias de 4ª e 5ª ordem.	57
Figura 16 - Gráfico de barras de erros com os valores médios e de desvio padrão das métricas topográficas extraídas para os divisores de drenagem de 4ª ordem fluvial (divisores 1-30). (a-d) Elevação (a), declividade (b), amplitude (c) e χ (d). Faixas em cinza indicam divisores móveis. Cores azul e vermelho representam os lados de cada divisor de drenagem analisado.....	58
Figura 17 - Gráfico de barras de erros com os valores médios e de desvio padrão das métricas topográficas extraídas para os divisores de drenagem de 4ª ordem fluvial (divisores 31-60). (a-d) Elevação (a), declividade (b), amplitude (c) e χ (d). Faixas em cinza indicam divisores móveis. Cores azul e vermelho representam os lados de cada divisor de drenagem analisado.....	59
Figura 18 - Distribuição espacial dos divisores de drenagem das sub-bacias de 5ª ordem com seus respectivos graus de mobilidade, incluindo a distribuição dos principais tipos de rochas. A-C) Setores analisados (A = Setor A; B = Setor B e C = Setor C; ver localização espacial dos setores analisados na Figura 11).	60
Figura 19 - Distribuição espacial dos divisores de drenagem das sub-bacias de 4ª ordem com suas respectivas classes de grau de mobilidade, incluindo a localização dos principais tipos de rocha. A-C) Setores analisados (A = Setor A; B = Setor B e C = Setor C; ver localização espacial dos setores analisados na Figura 11).	61
Figura 20 - Direção de mobilidade dos divisores de drenagem das sub-bacias de 5ª ordem com suas respectivas classes de grau de mobilidade.	62
Figura 21 - Direção de mobilidade dos divisores de drenagem das sub-bacias de 4ª ordem com suas respectivas classes de grau de mobilidade.	63
Figura 22 – Localização dos pontos (P1-P17) visitados em campo na região centro-sul do interflúvio Ibicuí-Jacuí, RS.....	64
Figura 23 – Imagens aéreas coletadas dos pontos P1 (A e B), P9 (C e D) e P13 (E e F). Note os contrastes entre a rede de drenagem em ambos os lados do divisor. Setas vermelhas = divisor de drenagem principal.....	67
Figura 24 - Hipsometria da região dos pontos P1, P2, P7, P8, P9, P10, P13, P14, P15, P16 e P17. Note as diferenças de dissecação em ambos os lados do divisor..	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais em relação à acurácia altimétrica de MDEs.	19
Tabela 2 - Distribuição dos pontos e das unidades geomorfológicas no Estado do RS.....	40
Tabela 3 - Resultados obtidos a partir da avaliação de aderência dos MDEs ao PEC-PCD nas unidades geomorfológicas do RS.....	41
Tabela 4 - Grau de mobilidade dos divisores de sub-bacias de 4ª e 5ª ordens.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
BDiA	Banco de Dados de Informações Ambientais
CEPSRM	Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
Copernicus DEM	<i>Global and European Digital Elevation Model</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DLR	Agencia Aeroespacial Alemã
EGM	<i>Earth Gravitational Model</i>
EM	Erro Médio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EP	Erro Padrão
EQM	Erro Quadrático Médio
ESA	Agencia Espacial Europeia
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICGEM	<i>International Centre for Global Earth Models</i>
INPE	Instituto Brasileiro de Pesquisas Espaciais
InSAR	Interferometria de Radar de Abertura Sintética
JAXA	Agencia de Exploração Aeroespacial do Japão
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGA	Agência Nacional de Inteligência Geoespacial
PCD	Produtos Cartográficos Digitais
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfico
PPGSR	Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
PRISM	<i>Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping</i>
RMSE	Erro Quadrático Médio
RRNN	Referência de Nível

RS	Rio Grande do Sul
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivos Específicos	17
3 REVISÃO TEÓRICA	17
3.1 Elementos de geodésia e cartografia	18
3.2 Elementos de hidrografia	20
3.2.1 Ordenamento fluvial	20
3.3 Modelo Digital de Elevação	21
3.3.1 SRTM	23
3.3.2 NASADEM	24
3.3.3 ALOS AW3D30	25
3.3.4 MDE Copernicus	26
3.4 Geomorfometria	26
3.4.1 Variáveis geomorfométricas	27
3.4.1.1 Processamentos para a delimitação de bacias hidrográficas	27
3.4.2 Métricas topográficas e a análise de mobilidade de divisores de drenagem	28
4 MATERIAL E MÉTODOS	30
5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ALTIMÉTRICA DE MDES GLOBAIS EM DIFERENTES UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL	31
5.1 Introdução	31
5.2 Métodos	32
5.2.1 Área de estudo	33
5.2.2 Pré-processamento de dados	36
5.2.3 Avaliação estatística do PEC-PCD	37
5.3 Resultados	38

5.3.1 Distribuição espacial das RRNN no Estado do RS	38
5.3.2 Descrição da aderência dos MDEs ao PEC-PCD	40
5.4 Discussão	42
5.5 Conclusões	43
6 ANÁLISE DA DINÂMICA DE MOBILIDADE NO INTERFLÚVIO JACÚ-IBICUÍ, RIO GRANDE DO SUL	44
6.1 Introdução	44
6.2 Métodos	45
6.2.1 Área de estudo	45
6.2.2 Delimitação da rede de drenagem e sub-bacias hidrográficas a partir do MDE	47
6.2.3 Análise de mobilidade dos divisores de drenagem	49
6.2.4 Dados de campo	50
6.3 Resultados	51
6.3.1 Caracterização das sub-bacias hidrográficas	51
6.3.2 Descrição da análise de mobilidade e estabilidade dos divisores de drenagem	55
6.3.3 Descrição dos dados obtidos em campo	64
6.4 Discussão	68
6.5 Conclusões	72
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICE A – Geologia da região referente as sub-bacias de 4 ^a ordem.....	80
APÊNDICE B – Geologia da região referente as sub-bacias de 5 ^a ordem.....	81

1 INTRODUÇÃO

Conhecer a superfície da Terra é uma tarefa de suma importância para fins meteorológicos, hidrológicos, ecológicos, atmosféricos, entre outros. Com o avanço da tecnologia espacial e disponibilização de dados de observação da Terra temos disponíveis atualmente vários modelos digitais de elevação (MDEs) são fontes de dados utilizados principalmente para a interpretação do relevo, possibilitando a extração de informações geométricas, numéricas e visuais (PIKE, 2000). Os MDEs podem ser obtidos de diferentes modos. Por exemplo, por sensoriamento remoto passivo e ativo utilizam-se dados orbitais e aéreos, aplicando técnicas de estereoscopia, interferometria e radargrametria. Os MDEs também podem ser obtidos através: de cartas topográficas já existentes, por derivação de curvas de nível; e por levantamento terrestre, fazendo uso de estações totais e Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS).

Um MDE é composto por um sistema de coordenadas e metadados contendo os componentes horizontais, verticais e temporais, isto é, o datum horizontal que determina como as coordenadas de latitude e longitude são mapeadas para a superfície terrestre; o datum vertical que define a referência de elevação podendo ser de referência elipsoidal ou geoidal; e o dado temporal, que compete à quando o dado foi obtido (GUTH *et al.*, 2021). Atualmente, destacam-se alguns MDEs globais ou quase-globais obtidos via sensoriamento remoto orbital e disponíveis gratuitamente, como por exemplo, o *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, *NASADEM*, *ALOS World 3D-30m (AW3D30)* e o *Copernicus DEM (COP-30)*. Estes MDEs são largamente utilizados, no entanto, são ainda necessários subsídios científicos que contribuam no processo de escolha de MDEs a serem utilizados na diversidade de aplicações possíveis.

A análise de MDEs a partir de técnicas de geoprocessamento permite extrair redes de drenagem, obter declividades, delimitar bacias hidrográficas e seus interflúvios, entre outras aplicações na hidrologia e geomorfologia. Para tanto, é fundamental o emprego de variáveis geomorfométricas. A geomorfometria moderna trabalha na extração de parâmetros da superfície da Terra, bem como características espaciais da topografia digital, ou seja, objetos da superfície da Terra (WILSON, 2012). Mudanças na paisagem, observadas a partir de relevo e drenagem, são passíveis de interpretação através de métricas topográficas. O modo

como a paisagem evolui implica na ocorrência de feições que podem ser identificadas e analisadas a partir da geomorfometria.

Um dos indicadores mais utilizados para estudo da evolução da paisagem é a rede de drenagem. À medida que a rede de drenagem avança sobre um divisor, ocorrem mudanças na área de drenagem, estas alterações podem implicar na mobilidade ou estabilidade de divisores de drenagem. O movimento ativo de um divisor de drenagem pressupõe que há diferenças nas taxas de erosão entre as bacias que compartilham um mesmo divisor. Sendo assim, muitos indicadores potenciais de estabilidade / mobilidade de divisores são essencialmente indicadores topográficos das taxas de erosão (FORTE e WHIPPLE, 2019). A análise de mobilidade e estabilidade de divisores de drenagem tem sido aplicada em contextos geológicos e geomorfológicos diversos (ALVES, *et al.*, 2022; WHIPPLE, *et al.*, 2017). Porém, faltam ainda estudos em diversas paisagens fluviais do território nacional explorando dados digitais de elevação provenientes de MDEs recentemente disponíveis para a comunidade científica.

Em decorrência da alta variedade de MDEs globais disponíveis sem custo e gerados por sistemas orbitais com características espectrais, espaciais, temporais e radiométricas distintas, surge a necessidade de avaliar a qualidade dos modelos globais/quase-globais frente a variabilidade de relevos e observar a adequação desses para aplicações hidrológicas e geomorfológicas, como na análise de estabilidade / mobilidade de grandes divisores de drenagem. Alguns estudos avaliaram a qualidade altimétrica de MDEs em contextos territoriais nacionais e internacionais (p.e., CREMON, *et al.*, 2022; GUTH e GEOFFROY, 2021; SOUZA, *et al.*, 2019). Apesar da importância desses estudos, o Rio Grande do Sul (RS) ainda carece de estudos que avaliem a qualidade de MDEs e os apliquem considerando a influência da variabilidade de relevo na natureza destes dados.

A região oeste do RS tem potencial favorável de aplicação de MDEs em estudos visando avaliar a mobilidade de divisores, devido à relevância espacial dos processos erosivos que ocorrem no interflúvio das bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Jacuí, pertencentes respectivamente, à região hidrográfica do Uruguai e região hidrográfica do Guaíba. Alguns estudos realizados no Estado do RS mencionaram a ocorrência de prováveis processos de captura nas redes de drenagem (p.e., HAUSMANN, 1962; AB'SABER, 1969). Lisboa e Castro (1998)

identificaram evidências do processo de captura das cabeceiras do Sistema Fluvial Camaquã pelas cabeceiras do Sistema Fluvial Jacuí, no RS. Análises prévias de imagens óticas e hipsométricas de MDEs revelou alta dissecação do relevo nesta região levantando a hipótese de que há instabilidade e mobilidade de sub-bacias no interflúvio Ibicuí-Jacuí e que a aplicação da geomorfometria pode permitir a detecção e avaliação desses distúrbios fluviais na região oeste do RS.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal do estudo é analisar a estabilidade e mobilidade de divisores de drenagem nos altos cursos das bacias hidrográficas do Ibicuí e Jacuí, Rio Grande do Sul, a partir de geomorfometria e dados *in situ*.

2.1 Objetivos Específicos

- I. Avaliar a acurácia vertical dos MDEs globais disponíveis gratuitamente (SRTM, NASADEM, AW3D30 e COP-30) utilizando referências de nível (RRNN) disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), frente as variabilidades de relevo no RS observando o comportamento dos MDEs em cinco unidades geomorfológicas;
- II. Determinar o grau de mobilidade e a direção de migração de divisores de drenagem localizados no alto curso das bacias hidrográficas dos rios Jacuí e Ibicuí a partir de geomorfometria e dados *in situ*.

3 REVISÃO TEÓRICA

Visando um melhor entendimento do assunto abordado neste trabalho, na sequência apresentam-se conceitos importantes da geodésia, cartografia, como o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), hidrografia, através dos conceitos de bacias e seus componentes, geomorfometria com foco nas delimitações de bacias, e MDEs e suas características principais.

3.1 Elementos de geodésia e cartografia

De acordo com a norma brasileira (NBR) 14.166, uma rede de referência cadastral é constituída por pontos de coordenadas planialtimétricas, materializados no terreno, referenciados a uma única origem (Sistema Geodésico Brasileiro - SGB) e a um mesmo sistema de representação cartográfica (ABNT, 1998, p. 5). O sistema geodésico de referência nada mais é que um conjunto de pontos geodésicos os quais descrevem a superfície física da Terra, implantados e materializados na porção da superfície terrestre.

Estes pontos são determinados por procedimentos operacionais associados a um sistema de coordenadas geodésicas, calculadas segundo modelos geodésicos de precisão, compatíveis com as finalidades a que se destinam, tendo como imagem geométrica da terra um elipsoide de referência pré-definido (SILVA e SEGANTINE, 2015, p. 26).

Um elipsoide de referência tem por principais elementos os seus semieixos polares (b) e equatorial (a), os quais variam dependendo do sistema utilizado. Formado por três eixos (X, Y, Z), o sistema de coordenadas cartesiano tridimensional é determinado sobre o elipsoide de revolução. Dependendo de onde localiza-se o ponto origem do sistema, o datum pode ser geocêntrico ou topocêntrico. O datum horizontal considerado geocêntrico é aquele em que o ponto de origem está localizado no centro de massa da Terra. Considera-se um datum horizontal topocêntrico quando ele é um vértice materializado na superfície física da Terra. Como consequência o datum topocêntrico pode sofrer algum deslocamento com o passar do tempo, enquanto o mesmo não ocorre com o datum geocêntrico. No Brasil, atualmente, os sistemas de referências mais utilizados são: o sistema WGS-84 e o SIRGAS2000, os quais possuem sistemas geocêntricos. Segundo Dal’Forno *et al.* (2010) as coordenadas (x, y, z), nesses sistemas, são expressas em função da latitude e da longitude geodésica, além da pequena normal e da grande normal ao elipsoide.

A medida de elevação de um ponto na superfície da Terra acima de um datum vertical determinado é chamada altimetria. Quando se trabalha com altimetria a NBR 13.133 (ABNT, 1994, p.5) informa sobre o datum vertical no Brasil “o referencial altimétrico do SGB coincide com a superfície equipotencial que contém o nível médio dos mares, definido pelas observações maregráficas tomadas na Baía de Imbituba, no litoral do estado de Santa Catarina, Brasil”.

Ao longo do território brasileiro existem diversos pontos de controle vertical implantados, que são denominados de Referência de nível (RRNN). Segundo Machado (2023, p.30) uma RRNN é constituída com nome, o número, altitude e o nome do órgão responsável. As Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional foram estabelecidas o Decreto-Lei nº. 89.817 de 1984 (BRASIL, 1984) o qual estabelece que o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) é um indicador estatístico, relativo a 90% de probabilidade. Segundo o decreto, em seu Art 8º:

§ 2º - A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão – PEC = 1,6449 EP.

§ 3º - O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§ 4º - Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático (BRASIL, 1984).

Com o surgimento de novas tecnologias, como a cartográfica digital, o decreto supracitado estabeleceu normas técnicas para produtos cartográficos digitais (PEC-PCD; Tabela 1). Através de adaptações de estudos prévios foram definidos os valores previstos para a classe “A” (PEC/PCD), sendo o PEC/PCD igual a 0,27 x a equidistância do produto cartográfico e o erro padrão (EP) equivalente a 1/6 x a equidistância do produto cartográfico. As demais classes “B”, “C” e “D” da PEC/PCD correspondem, respectivamente, as classes “A”, “B”, “C” do PEC altimétrico previstas no decreto (BRASIL, 1984).

Tabela 1 - Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais em relação à acurácia altimétrica de MDEs.

PEC PCD	1:10.000 (Eqd = 5 m)		1:25.000 (Eqd = 10 m)		1:50.000 (Eqd = 20 m)		1:100.000 (Eqd = 50 m)	
	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)
A	1,35	0,83	2,70	1,67	5,50	3,33	13,50	8,33
B	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,67
C	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00
D	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00

Fonte: Adaptado de BRASIL, 1984.

Onde EM é o erro médio, EP é o erro padrão e Eqd refere-se a equidistância.

3.2 Elementos de hidrografia

Uma bacia hidrográfica é um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, composta por cabeceiras ou nascentes, divisores d'água, e os processos e as interações que nela ocorrem (MEDEIROS *et al.*, 2009). O curso d'água principal é o rio de maior volume e extensão da bacia hidrográfica que recebe águas dos rios menores (afluentes) que têm função de abastecê-lo. As cabeceiras de drenagem é primeiro trecho da nascente de um curso de água. O exutório de drenagem é o ponto de menor altitude da bacia, ou seja, o local onde as águas encontram o oceano, um lago, ou deságuam em uma bacia hidrográfica maior.

Os interflúvios também chamados de divisores de drenagem são feições do relevo que limitam as áreas de uma determinada bacia hidrográfica. Segundo Forte e Whipple (2019) divisores de drenagem são limites organizadores fundamentais nas paisagens fluviais, delimitados por direção de fluxo de redes hidrográficas, que podem ser estáticos ou móveis (WILLETT *et al.*, 2014). Divisores móveis, modificam a paisagem através da erosão progressiva das cabeceiras de drenagem a montante, que podem resultar em capturas de drenagem, isto é, quando há uma interrupção do fluxo que anteriormente se direcionava para uma bacia que passará a drenar em direção a outra bacia/curso d'água .

3.2.1 Ordenamento fluvial

A ordem de uma bacia é classificada de acordo com o ordenamento de seus canais. Existem algumas classificações de hierarquia de ordenamentos dos canais da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica, sendo a mais utilizada a de Horton modificada por Strahler (TUCCI, 2004). A hierarquia é apresentada como: canais de 1ª ordem são os menores identificáveis caracterizados por drenagens intermitentes; e os canais de 2ª ordem são formados pela confluência de dois canais de primeira ordem. Esta lógica é aplicada para as demais ordens, onde a confluência de dois canais de ordem n resulta em um canal de ordem $n+1$ a jusante. Na situação em que um canal de ordem menor encontrar um de ordem maior, prevalece a ordem maior. A ordem da bacia hidrográfica é designada como a ordem do rio que passa pelo exutório (TUCCI, 2004).

3.3 Modelo Digital de Elevação

Valeriano (p. 21, 2008) define que MDEs são arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem com um valor de elevação em cada pixel. Um MDE é responsável por registrar a superfície entre a atmosfera (i.e., camada de gases) e a litosfera (i.e., camada sólida externa do planeta constituída por rochas e solo) através de uma grade bidimensional discreta, considerando as complexibilidades da hidrosfera (i.e., massa de água líquida), criosfera (i.e., massa de água congelada), biosfera (i.e., massa de organismos vivos) e antroposfera (i.e., massa de matéria processada pelo homem) (GUTH *et al.* 2021).

É fundamental que um MDE esteja referenciado a um sistema de coordenadas o qual precisa ser especificado nos metadados. Este sistema de coordenados possui três componentes, sendo eles: o horizontal, o vertical e o temporal. O componente horizontal também chamado datum horizontal pode ser definido em escala global, regional, nacional ou local. Ele é responsável por determinar como as coordenadas de latitude e longitude são mapeadas. O componente vertical define a elevação, que pode ser referenciada a uma superfície elipsoidal ou geoidal. O componente temporal diz respeito à quando os dados de elevação foram obtidos, visto que a superfície terrestre está em constante mudança (GUTH *et al.* 2021).

O MDE é um termo genérico sem a preocupação em diferenciar os modelos que representam ou não o solo exposto, sendo assim ele pode ser classificado conforme a informação de referência ao que ele representa, como o modelo digital de superfície (MDS) que registra a superfície da Terra, ou seja, tudo o que se encontra no limite inferior da atmosfera, a altimetria de todos os objetos existentes acima do solo, isto inclui a litosfera, hidrosfera, criosfera, antroposfera. Os MDEs globais utilizados se constituem originalmente em MDS.

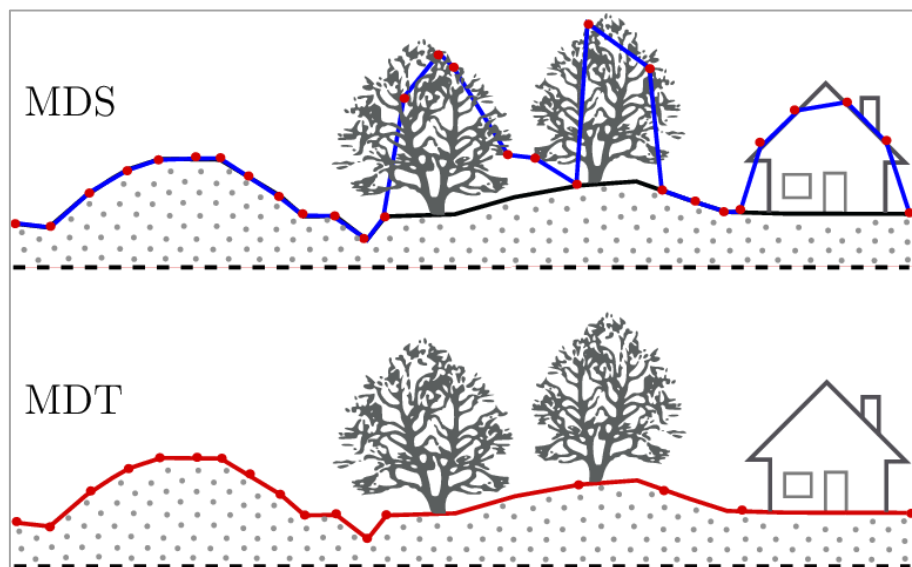
Um MDS consiste em um produto cartográfico obtido a partir de um modelo matemático que representa o solo exposto e os acidentes encontrados acima do solo (edificações, pontes, vegetação, etc.), de forma contínua e suavizada, a partir de dados adequadamente estruturados e amostrados do mundo real. (SALVADOR, 2018).

Já o modelo digital de terreno (MDT) expressa apenas o terreno, excluindo a biosfera e antroposfera, ou seja, mostra o terreno nu, sem a vegetação, construções,

etc (Figura 1). A obtenção de MDT exige processamentos sobre os dados originais que visam a remoção da informação altimétrica referentes aos objetos de cobertura do solo.

Um MDT é um produto cartográfico obtido derivado de um modelo matemático que representa o solo exposto, de forma contínua e suavizado, com dados adequadamente estruturados e amostrados da superfície física da Terra, ou seja, isentos de vegetação e elementos não pertencentes ao solo (edificações, pontes, veículos, placas, postes, etc.) (SALVADOR, 2018).

Figura 1 - Diferença entre o MDS (linha azul) e o MDT (linha vermelha). Pontos vermelhos representam os pontos de elevação amostrados no terreno.



Fonte: CARRILHO, 2016.

Para a criação de um MDE existem três principais técnicas: (i) as de levantamento em geomensura fazendo o uso de estação total, laser scanner, levantamentos por GNSS; (ii) técnicas utilizando cartas topográficas já existentes, e (iii) técnicas de sensoriamento remoto fazendo o uso fotogrametria convencional, fotogrametria com dados orbitais com ângulos de imageamento diferentes, através de drones, empregando interferometria, nuvem de pontos, entre outros (GERENTE, 2018). A seguir são apresentados alguns MDEs globais ou quase globais gratuitos, comumente utilizados em pesquisas geomorfológicas, inclusive na abordagem proposta nesta pesquisa.

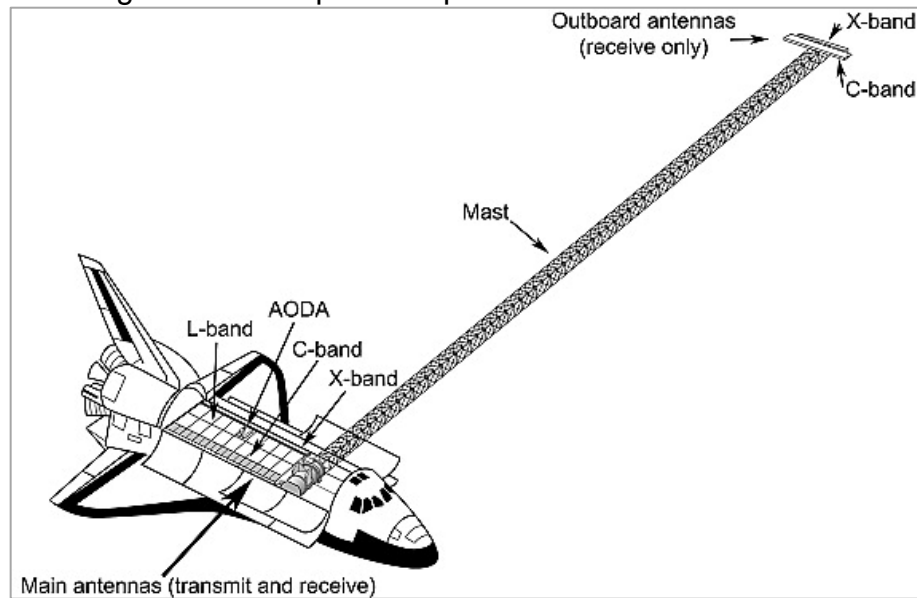
3.3.1 SRTM

O modelo SRTM foi elaborado através de uma missão chamada *Shuttle Radar Topography Mission* em parceria com a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), a Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (NGA) e das Agências Espaciais Alemã e Italiana. Essa missão fez uso da técnica de Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR) utilizando imagens de posições distintas para o cálculo da elevação. O objetivo da missão foi adquirir um MDE da Terra entre cerca de 60° de latitude norte e 56° de latitude sul, cobrindo cerca de 80% da superfície terrestre (FARR *et al.*, 2007). Este modelo gerou mais completo banco de dados topográfico digital de alta resolução da Terra e foi considerado um grande marco na época.

Em termos quantitativos, os produtos cartográficos derivados dos dados SRTM deveriam ser amostrados em uma grade de 1 arc seg. por 1 arc. seg. (aproximadamente 30 m por 30 m), com erro linear vertical absoluto de altura inferior a 16 m, linear vertical relativo erro de altura inferior a 10 m, erro circular absoluto de geolocalização inferior a 20 m e erro circular relativo de geolocalização inferior a 15 m. O erro de altura relativa dos dados SRTM da banda X deveria ser inferior a 6 m (FARR *et al.* 2007, p. 3).

A missão SRTM a bordo do *Space Shuttle Endeavour* ocorreu em fevereiro de 2000, com uma duração de 11 dias. Foram utilizados dois radares de abertura sintética, um sistema na banda C (5,6 cm) para gerar cobertura de mapeamento contígua e um sistema na banda X (3,1 cm) para gerar dados ao longo de faixas discretas de 50 km de largura (FARR *et al.*, 2007). Para operações de interferometria de passagem única, cada um dos dois radares foi equipado com uma antena suplementar somente de recepção, além das principais antenas de transmissão/recepção situadas no compartimento de carga útil do ônibus espacial. As antenas suplementares foram colocadas na extremidade de um mastro retrátil de 60 m (FARR *et al.*, 2007) (Figura 2).

Figura 2 - Principais componentes da missão SRTM.



Fonte: FARR, 2007.

Após a coleta dos dados, foram geradas diferentes versões de disponibilização do MDE SRTM, a primeira em 2003 chamada de SRTM V.1. Com reduzidos processamentos, a versão V.1 possui vários vazios nos locais de corpos d'água e onde a geometria do relevo impedia a reflexão do sinal. A segunda versão (SRTM V2) surgiu em 2004 onde foram minimizados os ruídos e parte dos vazios. A terceira versão (SRTM V2.1) foi divulgada em 2005, produto de diversos processamentos que visaram a qualificação dos dados e foi a versão mais usada pelos pesquisadores da época. Apenas em 2014 a NASA liberou o acesso a versão mais recente da série, a SRTM V.3. A versão V.3 possui datum horizontal WGS84 (EPSG:4326) e datum vertical WGS84 (EGM96 GEOID), ou seja, referenciado ao geóide, com pixels de 1 segundo de arco (~ 30 m), sistema de referência de coordenadas geográficas e 16 bits de resolução radiométrica.

3.3.2 NASADEM

Lançado em 2020 pela NASA, o MDE NASADEM é um reprocessamento completo dos dados originais de radar da missão SRTM do ano de 2000, melhorando os vazios que existiam através de algoritmos mais recentes e robustos, e com dados de outras fontes, eliminando os efeitos da oscilação do mastro de 60m (CRIPPEN *et al.*, 2016). (BETTIOL *et al.*, 2021)

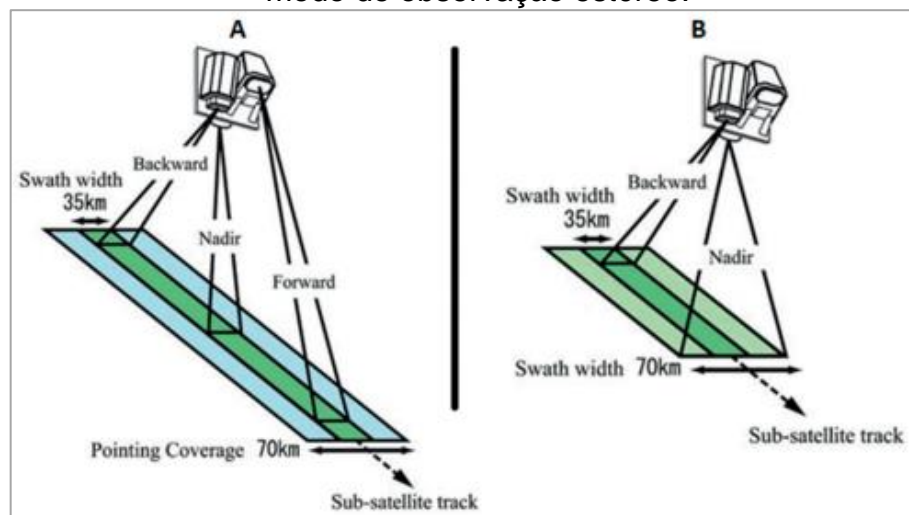
Os dados SAR interferométricos SRTM foram reprocessados com uma técnica híbrida. Esses dados resumem-se a imagens de radar utilizadas para criar interferogramas de matrizes de fase bidimensionais, resultando em maior precisão de elevação (MACHADO, 2023, p.23).

O MDE NASADEM possui como datum horizontal o WGS84 (EPSG:4326) e datum vertical o EGM96 (EPSG: 5773), pixels de 1 segundo de arco (~ 30 m), sistema de referência de coordenadas geográficas e 16 bits de resolução radiométrica. Apesar desse MDE ter sido lançado apenas em 2020 os dados brutos originais são do ano de 2000.

3.3.3 ALOS AW3D30

O modelo ALOS World 3D-30m (AW3D30) foi produzido com os dados do sensor PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*) a bordo do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) (TADONO *et al.*, 2016). Trata-se de um conjunto de dados com limites espaciais entre as latitudes de 82° norte e 82° sul e as longitudes de 180° leste e 180° oeste. O ALOS-PRISM possui três câmeras, uma apontando para o nadir, uma para trás e uma para frente como mostra a Figura 3. Esse MDE foi gerado pela Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA). As imagens obtidas entre o período de 2006 a 2011 foram utilizadas para a geração do modelo através da técnica de estereoscopia aplicada a imagens ópticas (TADONO *et al.*, 2016).

Figura 3 - Observação das geometrias do PRISM. A = modo de observação triplo; B = modo de observação estéreo.



Fonte: EORC/JAXA, 2007.

O modelo AW3D30 possui pixels de 1 segundo de arco, ou seja, uma malha de ~ 30m, com sistema de referência de coordenadas geográficas e dados com 16 bits de resolução radiométrica. O AW3D30 é disponibilizado em datum horizontal WGS84 (EPSG:4326) e datum vertical WGS84 (EGM96 GEOID), ou seja, referenciado ao geóide.

3.3.4 MDE Copernicus

O MDE Copernicus é derivado da InSAR utilizando dados da missão TanDEM-X e TerraSAR-X na banda X realizada entre o período de 2011 e 2015. É um MDE de cobertura quase global e gratuito do programa Copernicus (*Global and European Digital Elevation Model*). Este MDE foi financiado pela Agência Espacial Europeia (ESA) e pela parceria entre a Agência Aeroespacial Alemã (DLR) e a *Airbus Defense and Space* (AIRBUS, 2020). O programa disponibiliza com livre acesso MDEs com resolução espacial de 30 m (COP-30) e 90 m (COP-90). Segundo Airbus (2020) as especificações técnicas dos produtos Copernicus DEM fornecem uma acurácia vertical relativa de <2 m para áreas com declividade de superfície inferior a 20% e <4 m para declividades maiores que 20%.

3.4 Geomorfometria

Quando se trabalha com análise digital do terreno através de MDEs, uma das principais ciências abordadas é a geomorfometria, ou seja, a quantificação da forma da superfície terrestre, combinada com o uso da matemática, engenharia, ciências da Terra e computação. Segundo Pike (2000) e Wilson (2012) a geomorfometria é uma ciência que busca quantificar e parametrizar a superfície terrestre, bem como dos demais elementos do meio físico que com ela possuem relações, através dela é possível extrair parâmetros da superfície da Terra, bem como características espaciais da topografia digital, ou seja, objetos da superfície da Terra. A Geomorfometria é utilizada para diversas aplicações ambientais, como para extrair / derivar elementos do terreno a partir das chamadas variáveis geomorfológicas. Essas podem ser usadas para calcular hidrogramas de bacias, estimar a erosão do

solo, mapear deslizamentos, prever movimentações de cursos d'água, entre outros (PIKE, 2000).

3.4.1 Variáveis geomorfométricas

Segundo Pike (2020) existem dois tipos de variáveis geomorfométricas, locais e não-locais ou regionais, ambas obtidas por operações de janelas móveis. As variáveis locais dependem dos valores de elevação dos vizinhos mais próximos. Exemplos de variáveis locais incluem as curvaturas verticais e horizontais, a orientação de encostas, a declividade, a forma do terreno e a própria altitude (PIKE, 2000). As variáveis geomorfométricas não-locais possuem relações não só com os valores dos vizinhos imediatamente mais próximos, mas também com um maior número de células adjacentes (PIKE, 2020). Exemplos de variáveis regionais incluem a altura topográfica, textura do relevo, integral hipsométrica, dissecação vertical e predominância do relevo.

A elevação de um ponto ou a altitude de um ponto está referenciado a um datum vertical, tendo como referência o nível médio dos mares. Segundo Gerente (2018) a variável elevação é lida diretamente do valor dos pixels de um MDE ou do valor de cota de curvas de nível. As demais variáveis são derivadas da elevação, como por exemplo, a declividade (variável local), que representa a taxa de variação da altitude em relação a uma distância horizontal (EVANS, 1972).

3.4.1.1 Processamentos para a delimitação de bacias hidrográficas

Em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), a operação de acumulação de fluxo é a etapa que sucede a direção de fluxo, o qual armazena o número de células que drenam para um determinado ponto no MDE. A acumulação de fluxo pode ser definida como a medida de quanto à jusante está a célula em relação à nascente de um rio. Esta operação é fundamental para a extração de canais de drenagem e das bacias de drenagem correspondentes.

Para a extração de bacias hidrográficas de maneira semiautomática, os SIGs ou os pacotes disponíveis para as principais linguagens de programação (p.e., R, Python e Matlab) utilizam como base um MDE. A partir dos produtos resultantes das

operações de direção e acumulação de fluxo conforme descrito anteriormente, obtêm-se a rede de drenagem e o limite de cada bacia hidrográfica.

As operações para geração automática de bacias hidrográficas a partir de MDE com programas computacionais de SIG envolvem os seguintes procedimentos: eliminação de reentrâncias e saliências do MDE (*Fill Sinks*), produção do mapa de direção de fluxo (*Flow Direction*), elaboração do mapa de fluxo acumulado (*Flow Accumulation*), mapeamento da rede de drenagem (*Stream Networks*) e a delimitação da bacia hidrográfica (*Watershed Delineation*) (MEDEIROS *et al.*, 2009, p.142)

As células que possuem valores altos no produto de fluxo acumulado são as áreas de concentração de fluxo, possibilitando assim identificar os canais de drenagem. Já as regiões de altitudes mais elevadas dentro da bacia hidrográfica são representadas por células com valores zero, as quais definem os limites das bacias (MEDEIROS *et al.*, 2009).

3.4.2 Métricas topográficas e a análise de mobilidade de divisores de drenagem

Diferentes abordagens (e.g., geológicas e geomorfológicas) podem ser utilizadas para inferir se um divisor é móvel ou estável na paisagem. O uso de métricas topográficas que têm relação com taxas de erosão, vêm apresentando grande potencial de aplicação para estudos com esse propósito (FORTE e WHIPPLE, 2019; WHIPPLE *et al.*, 2017). Esse é o caso da métrica χ (Chi) proposta por Perron e Royden (2012), que basicamente consiste na integração da área de drenagem ao longo da distância de fluxo de um rio (equação 1). χ assume uma relação linear com a elevação do canal em situações onde existe um balanço / equilíbrio entre as taxas de erosão e soerguimento na paisagem (FORTE e WHIPPLE, 2019, p. 104).

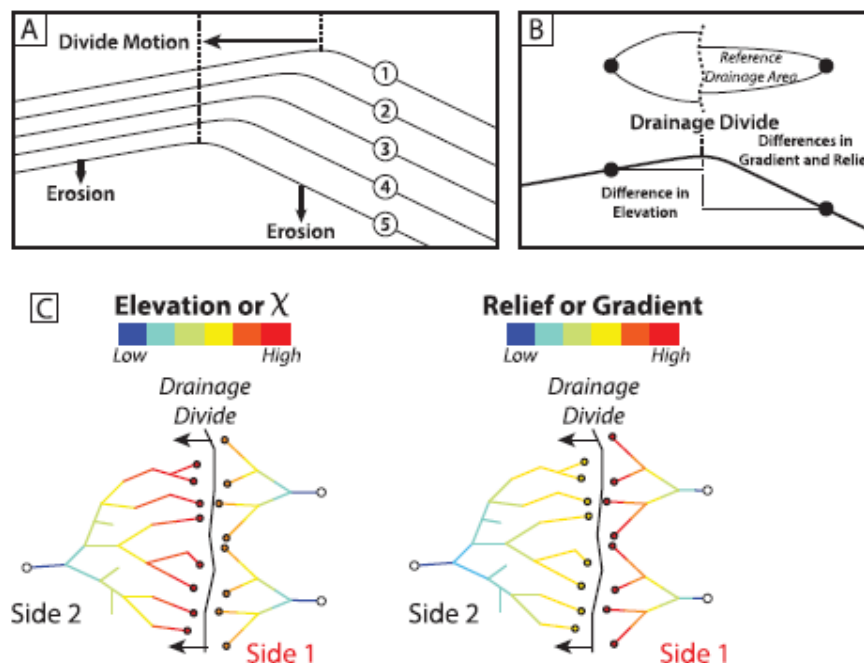
$$\chi = \int_{Xb}^X \left(\frac{A_0}{A(x')} \right)^{\theta_{ref}} dx' \quad (1)$$

De forma complementar a métrica χ , a investigação de estabilidade / mobilidade de divisores de drenagem também pode ser feita ao se analisar algumas métricas de rotina em pesquisas topográficas, também conhecidas como métricas de Gilbert (WHIPPLE *et al.*, 2017; FORTE e WHIPPLE, 2019), sendo elas: elevação, amplitude ou relevo relativo (diferença entre a elevação máxima e a mínima) e declividade / gradiente das cabeceiras de drenagem. Essas métricas topográficas

são bons indicadores (proxy) das taxas de erosão da paisagem, tornando a análise de estabilidade / mobilidade dos divisores mais confiável.

De acordo com Forte e Whipple (2019) o movimento de um divisor de drenagem pressupõe que há diferenças entre os as taxas de erosão nos divisores. Sendo assim, muitos indicadores potenciais de estabilidade / mobilidade de divisores são obtidos da topografia. A Figura 4A/B mostra os divisores se moverão quando as taxas de erosão não forem iguais em ambos os lados do divisor e que a diferença na taxa de erosão provavelmente será impulsionada por diferenças no gradiente topográfico em ambos os lados do divisor. Na Figura 4C ilustra o comportamento da direção de mobilidade das métricas, onde nas métricas de elevação ou χ o divisor vai se mover dos valores mais baixos para os valores mais altos e nas métricas amplitude e declividade o divisor vai se mover dos valores mais altos para os valores mais baixos.

Figura 4 - A) Esquema da “Lei das Declividades Desiguais” de Gilbert (1877). B) Área de drenagem de referência usada em todas as métricas para calcular diferenças do divisor. C) Funcionamento da direção de mobilidade das métricas estudadas.



Fonte: Adaptado de Forte e Whipple, 2019.

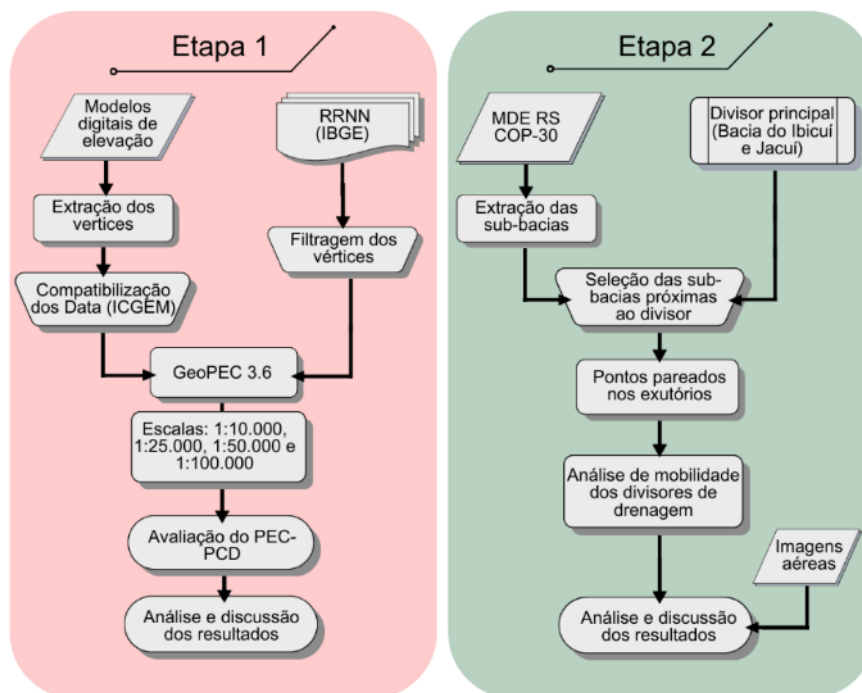
A análise conjunta da métrica χ e das métricas de Gilbert permite verificar diferenças geomorfométricas entre bacias que compartilham um mesmo divisor de

drenagem. Essas métricas podem ser utilizadas para desenvolver previsões sobre o grau de estabilidade ou mobilidade de divisores de drenagem, bem como fazer inferências sobre a direção preferencial de migração ou ainda previsões futuras sobre a transferência de áreas de drenagem entre bacias adjacentes.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento metodológico desta pesquisa foi dividido em duas etapas. A primeira etapa do estudo envolve a análise da acurácia vertical de MDEs globais a partir de pontos distribuídos ao longo de todo o estado do RS. Isto foi feito comparando a variabilidade do relevo para cinco unidades geomorfológicas deste estado. A segunda etapa, focada na análise de mobilidade de divisores de drenagem, tem como recorte espacial a faixa de interflúvio das bacias dos rios Ibicuí e Jacuí e sub-bacias associadas. A Figura 5 apresenta a cadeia de processamentos para cada etapa do estudo.

Figura 5 - Fluxograma das etapas elementares da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na sequência, diante do formato proposto para esta dissertação, serão apresentados na íntegra os métodos, bem como os resultados, discussões e conclusões deste trabalho no formato de dois artigos:

- i) Capítulo 5: Avaliação da qualidade altimétrica de MDEs globais em diferentes unidades geomorfológicas do Rio Grande do Sul, Brasil;
- ii) Capítulo 6: Análise da dinâmica de mobilidade de sub-bacias no interflúvio Jacuí-Ibicuí, Rio Grande do Sul.

5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ALTIMÉTRICA DE MDES GLOBAIS EM DIFERENTES UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

5.1 Introdução

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) fornecem dados planialtimétricos da superfície terrestre e são utilizados amplamente pela comunidade acadêmica e profissional para diversas aplicações referentes a análise digital do relevo, como nas engenharias, geologia, cartografia, ciências ambientais, geomorfologia, hidrografia, meteorologia, agronomia, biologia entre outras. MDEs podem ser obtidos de diferentes modos, por geomensura, sensoriamento remoto, a partir de sensores com diferentes resoluções espaciais e através de cartas topográficas pré-existentes (GERENTE, 2018). Atualmente, entre os mais populares estão os MDEs globais ou quase globais disponíveis gratuitamente, e que, em sua maioria possuem ~30 m de resolução espacial, que é o caso dos modelos SRTM, NASADEM, AW3D30 e o COP-30.

Estudos geomorfológicos do RS têm sido ampliados com o advento de MDEs globais e quase globais (p.e., ROBAINA *et al.*, 2010; MACHADO, 2023). O estado do RS possui distintas condições de relevo contendo áreas com topografia plana e acidentada, com altitudes que variam de 0 a 1.403 m. Essa variabilidade pode ser estudada a partir de cinco unidades geomorfológicas, incluindo, o Planalto Meridional (Planalto basáltico), Planície Costeira, Escudo Sul Rio-grandense, Depressão Central (Depressão periférica) e a Cuesta do Haedo (SUERTEGARAY e GUASSELLI, 2004), através de produtos cartográficos digitais como MDEs.

Quando se trata de geração de produtos cartográficos digitais no Brasil, existe uma regulamentação que define tolerâncias, bem como os procedimentos para tais,

o Decreto-Lei nº. 89.817 de 1984 (BRASIL,1984) o qual estabelece o Padrão de Exatidão Cartográfico (PEC), responsável por definir a acurácia de produtos cartográficos digitais. Tendo em vista que um MDE é amplamente utilizado com inúmeras finalidades, inclusive para a caracterização do relevo, é de suma importância que ele seja um dado acurado.

No Brasil, a avaliação da acurácia dos MDEs vem sendo testada em diferentes condições de topografia e relevo, como Cremon *et al.* (2022) que avaliou o modelo Copernicus com 30 m de resolução espacial no Estado de Goiás e Distrito Federal. Já Araújo *et al.* (2019) avaliou a precisão do modelo SRTM no Estado do Rio Grande do Norte. No Estado do Mato Grosso do Sul, o MDE AW3D30 foi avaliado na região pantaneira por Souza *et al.* (2019), o mesmo modelo foi avaliado também no Estado do Rio Grande do Sul, na região do Vale dos Vinhedos por Viel *et al.* (2020). Já Moraes *et al.* (2017) analisou os MDEs ASTER GDEM v.2 e SRTM v.3 com embasamento em amostragem de pontos de referência, estudados na área urbana de Belo Horizonte, no Estado de Minas Gerais.

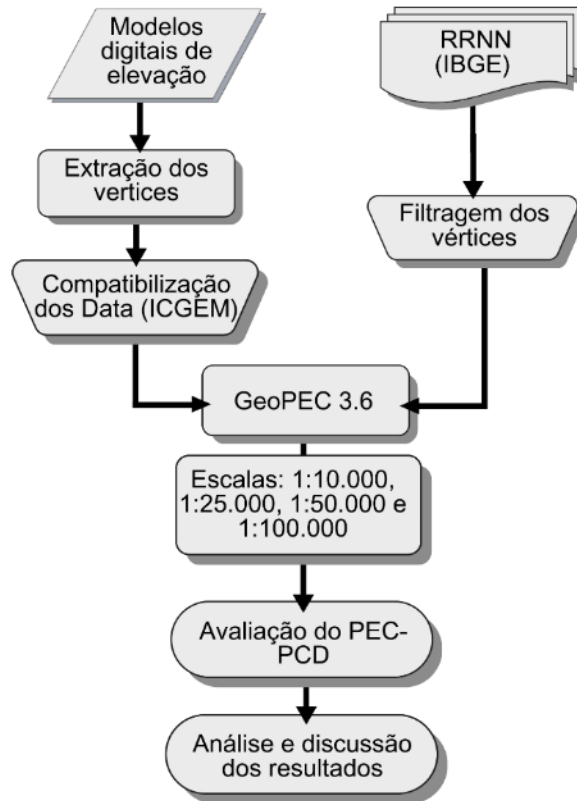
No entanto, novos estudos são necessários não apenas analisando a acurácia dos MDEs, mas também comparando-os entre eles, sobretudo avaliando MDEs disponíveis para a comunidade científica, portanto, o presente estudo poderá servir como referência para a tomada de decisão de outras pesquisas geomorfológicas realizadas em território estadual e nacional. Sendo assim, este estudo visa avaliar a acurácia vertical dos MDEs globais disponíveis gratuitamente, como o SRTM, NASADEM, AW3D30 e COP-30 utilizando como dados de referência as estações de referência de nível (RRNNs). Esta análise comparativa utiliza como área de estudo as cinco unidades geomorfológicas do estado do RS (SUERTEGARAY e GUASSELLI, 2004), a fim de classificá-los diante das normas e padrões do PEC-PCD.

5.2 Métodos

A investigação da qualidade altimétrica dos MDEs se baseou na análise comparativa entre os modelos SRTM, NASADEM, AW3D30 e COP-30 no estado do RS. A comparação se realizou nas cinco unidades geomorfológicas com o intuito de avaliar a influência do relevo na qualidade dos MDEs, tendo como base as RRNNs

fornechas pela rede altimétrica do IBGE. A Figura 6 apresenta as etapas metodológicas necessárias para atingir este propósito.

Figura 6 - Fluxograma das etapas de processamento para a avaliação da qualidade dos MDEs.

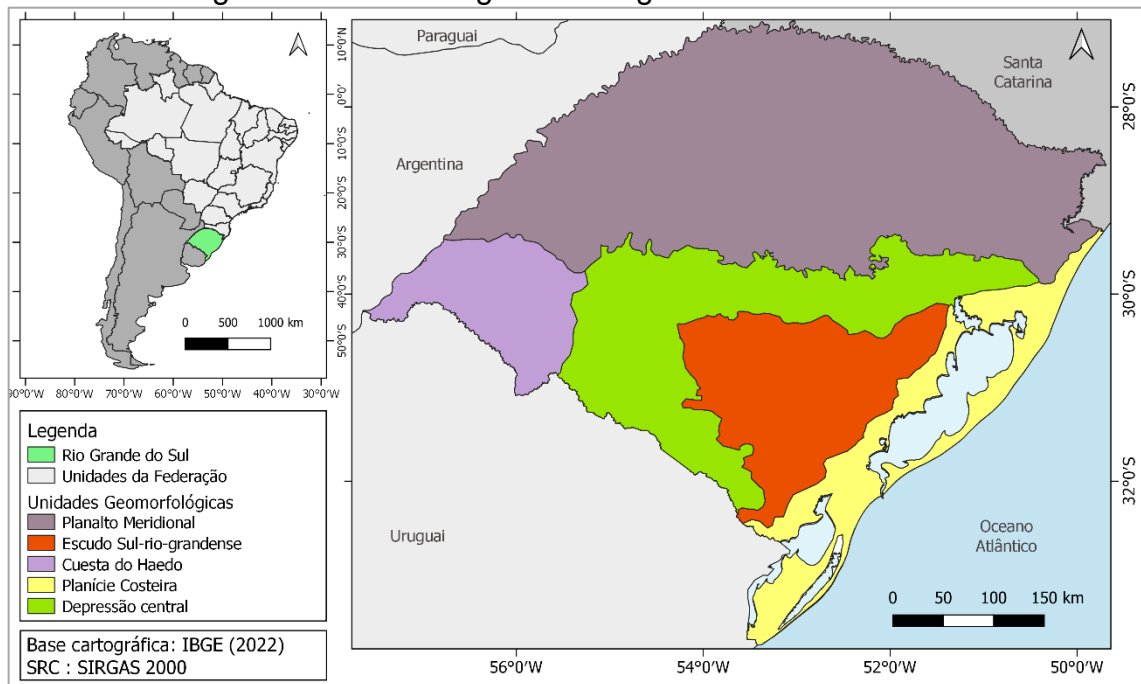


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.1 Área de estudo

A área de estudo abrange todo o estado do Rio Grande do Sul, região sul do território brasileiro. Esse estado é formado por 497 municípios, possuindo uma área total de 281.707,15 km². O enfoque desta pesquisa são as cinco unidades geomorfológicas do estado, sendo o Planalto meridional, Depressão Central, Escudo Sul-Rio-Grandense, Planície Costeira e a Cuesta do Haedo (SUERTEGARAY e GUASSELLI, 2004; Figura 7).

Figura 7 - Unidades geomorfológicas do estado do RS.



Fonte: Adaptado pela autora.

Segundo Holz (1999) a unidade geomorfológica (UC) do Escudo Sul-Rio-Grandense (Figura 7) possui substrato rochoso majoritariamente ígneo e metamórfico, cuja gênese das rochas datam desde o período Arqueano (mais de 2500 Ma) até o Ordoviciano (444-485 Ma). Neste setor, predominam as rochas ígneas plutônicas, principalmente de composição granítica, associadas a cinturões de rochas metamórficas como xistos, quartzitos, mármore, gnaisses, entre outros. Estas rochas estão recobertas, em algumas áreas, por sequências de rochas sedimentares e rochas vulcânicas, eventos datados do final do Paleozoico. Esta unidade constitui-se na estrutura geológica mais antiga do Estado (SUERTEGARAY e GUASSELLI, 2004). Segundo Streck *et al.* (2018) as elevações desta região variam de menos de 100 até 500 m distribuídas em relevos ondulados a forte ondulados.

A UC Depressão Central abrange predominantemente rochas sedimentares (Figura 7) que circundam o Escudo Sul-Rio-Grandense. As rochas sedimentares mais antigas da Depressão Central datam do Permiano, no Paleozóico e as mais recentes são do início do Cretáceo (Mesozoico) (STRECK *et al.*, 2018). O relevo desta unidade é constituído por padrões diferenciados de colinas que se apresentam com topos planos e topos convexos (SUERTEGARAY e GUASSELLI, 2004).

Segundo Streck *et al.* (2018) as elevações desta região variam de 40 e 100 m, representando relevos ondulados a suave ondulados (coxilhas).

A UC do Planalto Meridional (planalto basáltico) é formada por uma sucessão de pacotes de rochas vulcânicas, onde os derrames vulcânicos apresentam composições basálticas e riolíticas (STRECK *et al.*, 2018). Segundo Streck *et al.* (2018) esta unidade possui um relevo muito escavado pelos rios em alguns pontos formando escarpas e vales profundos. Na região dos Campos de Cima da Serra, porção nordeste do RS, os derrames vulcânicos possuem espessura diversa, em média 500-1000m (HARTMANN, 2014). A elevação na área é de até 1.403 m com escarpas abruptas esculpidas por processos erosivos, estas altitudes decrescem para menos de 100 m na direção oeste, região da Campanha (SUERTEGARAY e GUASSELLI, 2004; STRECK *et al.*, 2018).

A UC Planície Costeira é formada por sedimentos inconsolidados depositados a partir do fim do período Neógeno e durante o Quaternário. Segundo Suertegaray e Guasselli (2004) a sedimentação nesta unidade é característica de ambiente costeiro sob influência de eventos de transgressão e regressão marinhos, os sedimentos marinhos abrangem toda a costa leste do estado, apresentando dunas e planícies arenosas. A Planície costeira é marcada pela baixa variabilidade altimétrica, com elevações inferiores a 40 m (STRECK *et al.*, 2018).

A unidade geomorfológica Cuesta do Haedo é uma região do baixo planalto que apresenta variabilidade de planícies de inundação, morros tubulares e colinas (SUERTEGARAY e GUASSELLI, 2004). Segundo Pilau (2011) ela é constituída, em grande parte, por áreas de campos limpos, pastagens, zonas agrícolas e apresenta litologias representativas da Formação Botucatu, constituída por arenito eólicos avermelhados, médios e finos, e formação Serra Geral, formada de rochas vulcânicas, oriundas do vulcanismo de fissuras, principalmente basalto. A Cuesta do Haedo se constitui enquanto uma feição de relevo que apresenta as maiores altitudes alinhadas em sentido SW-NE, que decai para oeste em direção a calha do Rio Uruguai, onde atinge uma média de 80 m de altitude (SUERTEGARAY e GUASSELLI, 2004).

5.2.2 Pré-processamento de dados

O acesso dos MDEs SRTM, NASADEM e AW3D30 (datum vertical *Earth Gravitational Model* 1996 - EGM96) e o COP-30 (datum vertical *Earth Gravitational Model* 2008 - EGM2008) em formato GeoTiff foi feito através da plataforma OpenTopography (<https://opentopography.org>) de acesso gratuito. Como há um limite de tamanho a ser baixado nesta plataforma foi feito o *download* escalonado e realizou-se um mosaico das quadrículas dos MDEs para o Estado do RS. A obtenção dos pontos de controle verticais altimétricos (RRNN) de referência sucedeu através da rede do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) do IBGE, os quais foram refinados para que as curvas de nível se enquadrassem no intervalo de 20 a 20 m para que os pontos fossem compatíveis com a carta de escala 1: 50.000.

Através do software ArcGIS Pro, extraiu-se os valores de elevação de cada MDE a partir dos pontos correspondentes as RRNNs, fazendo o uso da ferramenta “*Extract values to points*”. Utilizando o Portal ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*) foi feito o *download* dos dados geoidais que serviram de base para a conversão dos modelos referenciados no datum EGM96 (SRTM, AW3D30 e NASADEM) para o EGM2008, visando deixar todos os modelos com o mesmo datum vertical para fins comparativos. O modelo EGM2008 tem acurácia de 5-10 cm, o que representa um acréscimo de até 6 vezes sobre o modelo EGM96 (CREMON *et al.*, 2022).

O embasamento para a conversão dos modelos EGMs foi a norma NBR 14.166 (ABNT, 1998) a qual fala que a altitude ortométrica (H) é a distância de um ponto ao longo da vertical entre a superfície física e sua projeção na superfície geoidal. Esta é a altitude das referências de nível. Já a altura geométrica, também chamada de altitude elipsoidal (h) é a distância de um ponto ao longo da normal ao elipsoide, entre a superfície física e a sua projeção na superfície elipsoidal. Esta altitude pode ser obtida por meio de rastreios de sistemas globais de navegação por satélite (GNSS). Ambas as altitudes estão relacionadas por meio da ondulação geoidal (N), que representa a diferença entre H e h. Portanto, para obter a altitude ortométrica a partir da altitude elipsoidal é preciso conhecer a ondulação geoidal, conforme equação abaixo (Equação 2):

$$H = h \pm N \quad (2)$$

Sendo assim, foi feita a conversão de todos os pontos extraídos dos MDEs para o modelo EGM2008, exceto para o MDE COP-30 que já estava nesta referência. Com os pontos no mesmo datum foi possível iniciar o processo de avaliação estatística.

5.2.3 Avaliação estatística do PEC-PCD

A avaliação da influência do relevo em cada unidade geomorfológica foi feita com base no decreto supracitado (BRASIL, 1984) onde estabeleceu que a tolerância vertical e o erro médio quadrático (EQM) devem respeitar a equidistância entre as curvas de nível. Essa análise foi feita através do *software* livre GeoPEC na versão 3.6, no qual os dados foram testados para as escalas de 1:10.000, 1:25.000, 1:50.000 e 1:100.000 (Tabela 1). Deste modo, o *software* avaliou estatisticamente este desempenho observando a aderência ao PEC, através das seguintes equações (Equação 3, 4, 5 e 6):

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum(Z_i - Z_{ref})^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$DESV. PADRÃO = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{ref})^2} \quad (4)$$

$$MÉDIA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{ref}) \quad (5)$$

$$PEC \text{ (calculado)} = EQM * 1,6449 \quad (6)$$

Sendo que Z_i é a altitude geopotencial do MDE, Z_{ref} é a altitude da RRNN e n é o número total de RRNN. O erro de cada ponto foi obtido através da diferença entre a coluna da tabela de atributos com o valor de altitude do MDE e a coluna com o valor da altitude do ponto da RRNN (equação 7).

$$Resíduos = (Z_{MDE} - Z_{RRNN}) \quad (7)$$

Os erros de cada ponto foram aderidos em faixa de latitude/longitude para os cálculos do EQM, valores médios e de desvio padrão (equações 3 - 5). Tendo como base os parâmetros do decreto (BRASIL, 1984), a análise foi realizada considerando o valor limite estabelecido para cada classe, sendo a Classe "A" o produto de maior

acurácia e a Classe “D” o de menor acurácia. Isto foi feito para cada uma das unidades geomorfológicas para cada um dos MDEs avaliados neste estudo.

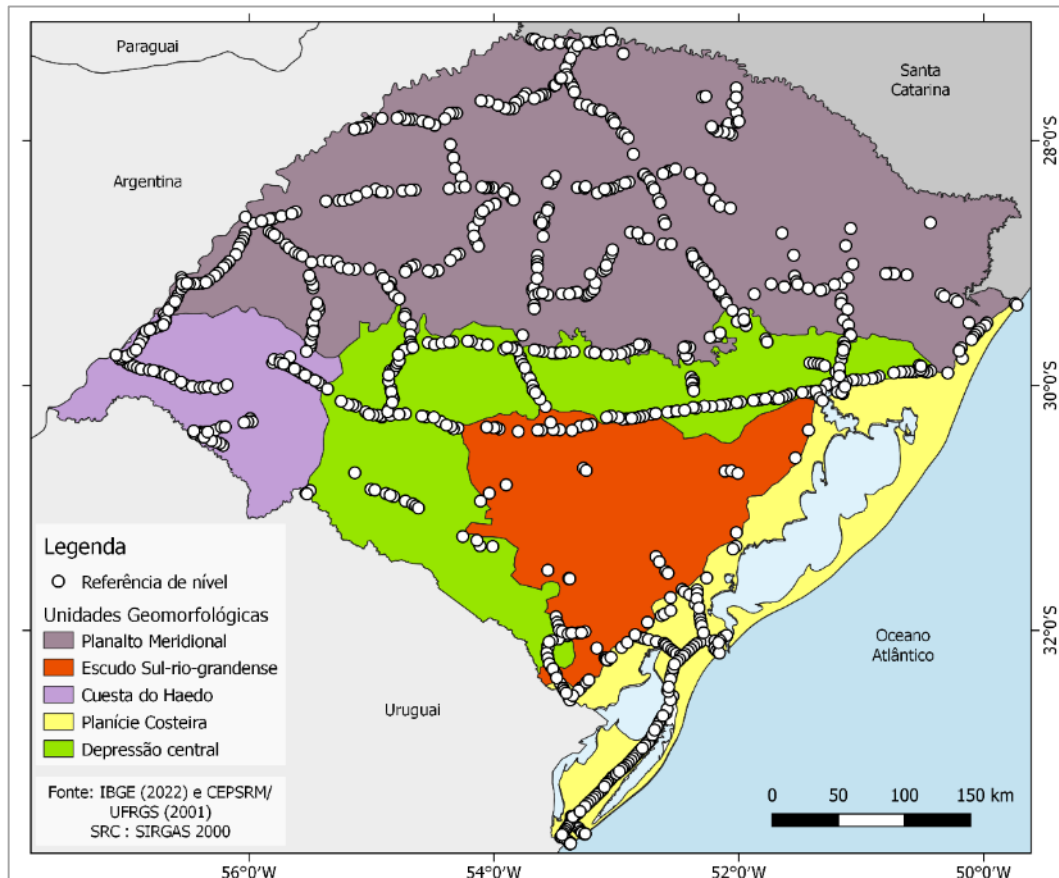
5.3 Resultados

Através dos processos realizados com os dados obtidos dos modelos SRTM v.3, NASADEM, AW3D30 e COP-30, bem como as RRNN obtidas através do SGB, os MDEs foram avaliados verificando sua classificação diante do PEC-PCD. Na sequência, apresenta-se a distribuição espacial das RRNN utilizadas como referência nas cinco unidades geomorfológicas do Estado do RS, bem como os resultados das aderências dos MDEs ao PEC-PCD.

5.3.1 Distribuição espacial das RRNN no Estado do RS

Após a etapa de pré-processamento dos dados foram obtidas 898 RRNN, as quais estão distribuídas de forma não homogênea nas cinco unidades geomorfológicas sendo 389 no Planalto Meridional, 56 no Escudo Sul-rio-grandense, 82 na Cuesta do Haedo, 159 na Planície Costeira e 212 na Depressão central, como mostra a Figura 8 abaixo.

Figura 8 - Distribuição espacial das RRRNN nas unidades geomorfológicas do Estado do RS.



Fonte: Elaborado pela autora.

A unidade geomorfológica Escudo Sul-rio-grandense representa 13,94% da área territorial do Estado do RS, e 6,24% dos pontos estudados estão localizados nessa unidade. Dos 898 pontos utilizados como referência para a análise 23,61% estão localizados na unidade Depressão Central, sendo que ela ocupa 19,48% do território total do Estado. A unidade Planalto Meridional representa 49,26% da área total do Estado do RS, e dos 898 pontos estudados 43,32% estão localizados nessa unidade. As unidades Planície Costeira e Cuesta do Haedo ocupam respectivamente 9,29% e 8,03% da área do Estado, sendo que 17,71% e 9,13% dos pontos estudados estão posicionados na Planície Costeira e Cuesta do Haedo, respectivamente. Estes dados podem ser observados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Distribuição dos pontos e das unidades geomorfológicas no Estado do RS.

Unidade geomorfológica	Pontos	Área (km²)	% Área total do estado	%Total de pontos por território
Escudo Sul-riograndense	56	37.327,93	13,94%	6,24%
Depressão Central	212	52.148,40	19,48%	23,61%
Planalto Meridional	389	131.884,37	49,26%	43,32%
Planície Costeira	159	24.869,89	9,29%	17,71%
Cuesta do Haedo	82	21.499,75	8,03%	9,13%
Total	898	267.730,34	100,00%	100,00%

Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.2 Descrição da aderência dos MDEs ao PEC-PCD

Através dos resultados das avaliações obtidas pelo *software* GeoPEC (Tabela 3), foi verificado que para as escalas 1:50.000 e 1:100.000 os quatro MDEs obtiveram Classe “A” para todas as cinco unidades geomorfológicas estudadas. Já para a escala 1:25.000 os modelos foram classificados como Classe “B”, apenas o MDE COP-30 foi classificado como Classe “A” nas unidades Planície Costeira e Cuesta do Haedo.

Para a escala 1:10.000 os modelos não foram bem classificados, em algumas unidades geomorfológicas não se enquadraram em nenhuma classe, como na unidade Escudo Sul-riograndense apenas os modelos COP-30 e SRTM foram classificados com Classe “C” e Classe “D”, respectivamente. Já na unidade Depressão Central apenas o modelo AW3D30 foi classificado, se enquadrando na Classe “D”. O modelo SRTM foi o único a se enquadrar em uma classificação nesta escala, ficando na Classe “D” na unidade do Planalto Meridional. Para as unidades Planície Costeira e Cuesta do Haedo todos os MDEs foram classificados ao menos na classe “D”, porém, o MDE COP-30 foi o modelo que melhor se aderiu, classificado como Classe “B”.

Tabela 3 - Resultados obtidos a partir da avaliação de aderência dos MDEs ao PEC-PCD nas unidades geomorfológicas do RS.

Unidade geomorfológica	Modelo digital de elevação	RMSE (m)	Desvio Padrão (m)	1:10.000 (5m)	1:25.000 (10m)	1:50.000 (20m)	1:100.000 (50m)
Escudo Sul-riograndense	COP-30	1,864	1,880	C	B	A	A
	SRTM v.3	1,883	1,851	D	B	A	A
	NASADEM	2,336	2,319	-	B	A	A
	AW3D30	2,312	1,928	-	B	A	A
Depressão Central	COP-30	2,326	2,270	-	B	A	A
	SRTM v.3	2,392	2,130	-	B	A	A
	NASADEM	2,315	2,319	-	B	A	A
	AW3D30	2,279	1,958	D	B	A	A
Planalto Meridional	COP-30	2,600	2,523	-	B	A	A
	SRTM v.3	2,209	2,049	D	B	A	A
	NASADEM	2,753	2,756	-	B	A	A
	AW3D30	2,413	2,134	-	B	A	A
Planície Costeira	COP-30	1,334	1,322	B	A	A	A
	SRTM v.3	1,865	1,838	D	B	A	A
	NASADEM	2,172	2,156	D	B	A	A
	AW3D30	1,700	1,667	C	B	A	A
Cuesta do Haedo	COP-30	1,626	1,574	B	A	A	A
	SRTM v.3	2,003	2,001	D	B	A	A
	NASADEM	1,986	1,968	C	B	A	A
	AW3D30	1,957	1,700	D	B	A	A

Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os resultados obtidos para desvio padrão e raiz do erro quadrático médio (RMSE) mostrados na Tabela 3, observa-se que o modelo COP-30 teve menor RMSE. O SRTM teve menor desvio padrão na unidade do Escudo Sul-riograndense. Na unidade Depressão Central os valores mais baixos foram obtidos utilizando o modelo AW3D30. Já no Planalto Meridional o modelo SRTM obteve os valores de desvio padrão e RMSE menores. Por fim, o modelo COP-30 obteve os melhores resultados na Planície Costeira e Cuesta do Haedo.

5.4 Discussão

Analisando os resultados obtidos (Tabela 3) para a escala de 1:10.000 nas unidades geomorfológicas Planície Costeira e Cuesta do Haedo, marcada pela baixa variabilidade altimétrica, altitudes mais baixas e os relevos mais planos, os quatro modelos estudados COP-30, SRTM v.3, NASADEM e AW3D30 tiveram melhores classificações diante do PEC-PCD. Condição semelhante foi constatada em outros trabalhos (e.g. MORAIS *et al.*, 2017; JAIN *et al.*, 2017), onde os erros dos modelos digitais de elevação analisados tendiam a aumentar com o aumento da declividade, ou seja, em áreas com relevos mais acidentados, com maior variabilidade altimétrica os erros tendem a ser maiores.

No estudo feito por Viel *et al.* (2020) na região do Vale dos Vinhedos, localizado numa área de maior declividade da unidade geomorfológica do Planalto Meridional, foi observado que o modelo SRTM v.3 obteve os melhores resultados. Essa condição foi semelhantemente observada nos MDEs testados neste estudo. O modelo SRTM v.3 foi o modelo que obteve menores valores de RMSE e desvio padrão no Planalto Meridional, sendo o único modelo que se enquadrou no PEC-PCD na escala 1:10.000, apesar de ter sido classificado como Classe “D”.

Observando os valores de RMSE obtidos para os modelos estudados, o MDE COP-30 obteve o menor valor de erro médio entre as cinco unidades geomorfológicas, com 1,95 m. Este resultado corrobora estudo realizado na região Centro-Oeste do Brasil (CREMON *et al.*, 2022), o qual também teve por valores de referência as RRNN, e obteve RMSE de 1,98m, valor próximo ao obtido neste estudo.

Analisando os valores de desvio padrão a partir da média dos modelos em cada unidade geomorfológica, o menor desvio padrão se encontra na Planície costeira, 1,397m, e o maior no Planalto meridional, 1,892m. Observando os dados obtidos por Machado (2023), onde avaliou de forma semelhante os modelos SRTM v.3 AW3D30 e NASADEM mantendo o EGM2008, nas mesmas unidades geomorfológicas, também foi observado menor desvio padrão médio foi na Planície costeira e o maior no Planalto meridional.

Da mesma forma, Guth e Geoffroy (2021) analisaram os modelos AW3D30, ASTER GDEM, COP-30, NASADEM e SRTM v.3 em comparação com nuvens de

pontos LiDAR e dados do satélite ICESat-2 em oito regiões do globo, sendo uma na Noruega, uma na Eslovênia, quatro no Estados Unidos da América e duas na Espanha, com relevos moderados e com variedades de climas e cobertura do solo, concluindo que o modelo COP-30 apresentou a melhor representação do terreno, sendo assim, apesar de ter dados de referência distintos a esta pesquisa, em ambos os casos, similarmente o COP-30 foi o modelo que forneceu os melhores resultados, levando em consideração de que os demais modelos foram atualizados para o mesmo datum nesta pesquisa.

5.5 Conclusões

Os modelos digitais de elevação estudados - SRTM v.3, NASADEM, AW3D30 e COP-30 - cumpriram os requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras de PEC-PCD, sendo que todos os modelos obtiveram Classe "A" nas escalas inferiores a 1:50.000 em todas as unidades geomorfológicas, e no mínimo Classe "B" para a escala de 1:25.000. Contudo, na unidade do Escudo Sul-rio-grandense o modelo COP-30 teve menor RMSE, e o MDE SRTM teve menor desvio padrão. Na unidade Depressão Central os valores mais baixos foram obtidos para o modelo AW3D30. Já para na unidade Planalto Meridional o SRTM foi o modelo que teve mais aderência as RRNN. O modelo COP-30 obteve os melhores resultados na Planície Costeira e Cuesta do Haedo.

De modo geral, o MDE COP-30 foi o modelo que obteve menores erros, ou seja, mais se aderiu as RRNN utilizadas como referência, apesar de que os demais modelos obtiveram resultados semelhantes. Quando analisados separadamente nas unidades geomorfológicas outros modelos foram melhores, sendo assim, para a definição do melhor modelo a utilizar deve-se observar alguns critérios como a escala de análise, a localização da área de estudo, a precisão desejada bem como o objetivo principal do estudo.

6 ANÁLISE DA DINÂMICA DE MOBILIDADE NO INTERFLÚVIO JACUÍ-IBICUÍ, RIO GRANDE DO SUL

6.1 Introdução

A superfície terrestre está em constante mudança, erosão e deposição, soerguimento e subsidência, etc. Os diferentes substratos rochosos, sob os quais se modelam as formas de relevo, possuem relevância nesses processos, já que resistem e respondem a erosão de modos distintos (Willett *et al.*, 2014). Segundo Willett *et al.* (2014) as paisagens que sofrem mudanças em seu contorno hidrográfico, como aquelas caracterizadas por rios encaixados e taxas de erosão contrastantes entre bacias de drenagem adjacentes podem impulsionar a migração de divisores e desenvolver capturas fluviais. As bacias hidrográficas são dinâmicas e os divisores podem mover-se especialmente quando há taxas de erosão contrastes em lados opostos do divisor, mas trata-se de um fenômeno raro.

Segundo Bishop (1995) a reorganização da drenagem refere-se à transferência de fluxo (parcial ou total) e a incorporação de áreas drenadas, de um canal por outro. Geralmente, esse processo ocorre entre pequenos canais fluviais, principalmente entre cabeceiras de drenagem que partilham um mesmo interflúvio. São reconhecidos três mecanismos principais de reorganização de drenagem a captura fluvial, desvio ou transbordamento e a decapitação (BISHOP, 1995). O modo como a paisagem evolui implica na ocorrência de feições que podem ser identificadas e analisadas a partir da interpretação de algumas métricas topográficas extraídas de modelos digitais de elevação (MDEs; FORTE e WHIPPLE, 2019; WHIPPLE *et al.*, 2018).

A evolução da paisagem pode ocorrer por alterações resultantes da área de drenagem e relevo. Segundo Carvalho Júnior *et al.* (2023) é vital que a geomorfologia brasileira tenha atenção especial para estudos que envolvem a reorganização de drenagem, devido a própria configuração do relevo sul-americano e tipos climáticos tropicais úmidos, que favorece a instalação de grandes redes de drenagem. Vários estudos abordam a análise de mobilidade e estabilidade de

divisores de drenagem em contextos geológicos e tectônicos diversos (ALVES *et al.*, 2022; WHIPPLE *et al.*, 2017; WILLETT *et al.*, 2014).

Apesar da popularização de modelos digitais globais na última década, a disponibilidade relativamente recente de métodos para avaliar a dinâmica de mobilidade de divisores de drenagem, estudos com este propósito são ainda escassos no Brasil, principalmente na região sul do país. No sul do Brasil, o contraste espacial dos processos erosivos que ocorrem nos altos cursos das bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Jacuí, pertencentes respectivamente, à região hidrográfica do Uruguai e do Guaíba no Rio Grande do Sul (RS), torna essa uma área com potencial favorável para a aplicação da análise de mobilidade de divisores de drenagem a partir de MDEs. Alguns estudos realizados no Estado do RS mencionaram a ocorrência de prováveis processos de captura nas redes de drenagem (p.e., HAUSMANN, 1962; AB'SABER, 1969). Lisbôa e Castro (1998) identificaram evidências do processo de captura das cabeceiras do Sistema Fluvial Camaquã pelas cabeceiras do Sistema Fluvial Jacuí, no RS, em consequência da erosão regressiva da bacia capturada pela bacia capturante.

Análises prévias a partir de imagens óticas e hipsométricas derivadas de MDEs no divisor Jacuí-Ibicuí no RS revelou destacada exposição a mecanismos de reorganização de drenagem. Sendo assim, o objetivo deste estudo é analisar a mobilidade e estabilidade de sub-bacias hidrográficas no interflúvio Jacuí-Ibicuí no RS, bem como determinar o grau (intensidade) e direção de mobilidade a partir da geomorfometria e dados *in situ*. Neste estudo, parte-se da hipótese de que há instabilidade e mobilidade nas sub-bacias hidrográficas do interflúvio Jacuí-Ibicuí e que a aplicação da geomorfometria pode permitir a detecção e avaliação desses distúrbios fluviais na região.

6.2 Métodos

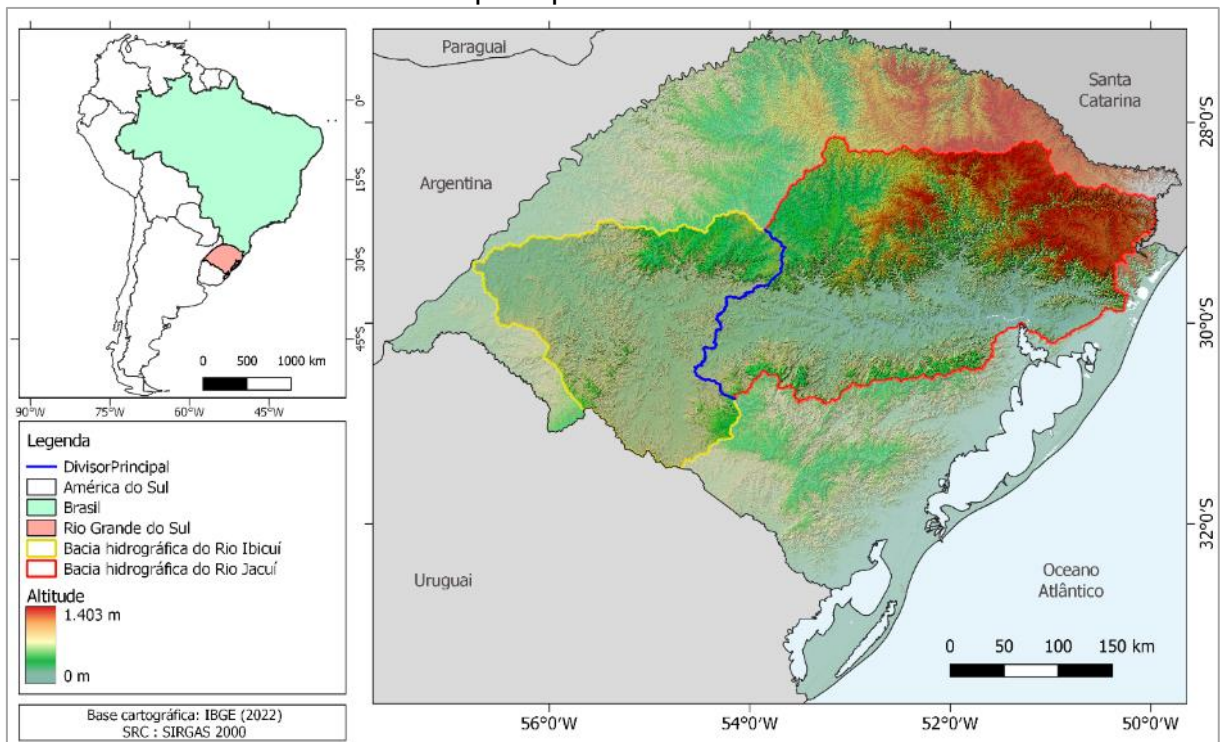
A investigação da análise da dinâmica de mobilidade teve por foco o interflúvio Ibicuí-Jacuí apresentado na subseção 6.2.1, e os processos metodológicos para o estudo estão descritos nas subseções 6.2.2, 6.2.3 e 6.2.4 abaixo.

6.2.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa são as bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Jacuí, pertencentes, respectivamente, à região hidrográfica do Uruguai e região hidrográfica do Guaíba no RS, Brasil. Estas bacias hidrográficas somadas ocupam aproximadamente 50% do total do território do estado do RS.

Segundo Rossato (2011) o estado do RS possui quatro tipos climáticos subtropicais, os quais variam de acordo com a umidade e as precipitações que ocorrem no estado, que dependendo da região variam de 1.200 mm a 2.000 mm anuais. No estado do RS existem vários rios, os quais captam essas águas, dentre eles os rios Ibicuí e Jacuí e seus afluentes, objetos de estudo desta pesquisa que podem ser observados na Figura 9 .

Figura 9 - Localização das bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Jacuí e o divisor principal estudado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo Robaina *et al.* (2010) a bacia hidrográfica do Ibicuí possui uma divisão geomorfológica composta pelo Planalto da Serra Geral, Depressão Central e o Escudo Sul-rio-grandense. Gass *et al.* (2020) abordam que o Rio Ibicuí possui uma alta carga sólida composta de sedimentos arenosos, em especial na sua porção inferior. O transporte de sedimentos nesta bacia é evidenciado sobretudo nos

períodos de estiagem, em que afloram bancos de areia ao longo do rio. A área da bacia é de 46.602,58 km², o perímetro de 1.268,76 km e o canal principal apresenta uma extensão de 1.302 km, desde a nascente do Rio Santa Maria até a foz onde o Rio Ibicuí deságua no rio Uruguai.

O rio Ibicuí está localizado na região oeste do estado do RS, sendo o maior afluente da margem esquerda da bacia do rio Uruguai. Suas águas são de suma importância para a população local, pois são utilizadas para irrigação em plantações de arroz, para o comércio de peixes, como também para a extração de areia. Simioni *et al.* (2014, p.129) pesquisaram a respeito da precipitação pluviométrica na bacia do rio Ibicuí e encontraram duas dinâmicas climáticas diferentes: no médio-baixo curso do rio, a precipitação anual registra aproximadamente 1200 milímetros. A outra área é caracterizada pela abrangência da depressão central gaúcha a precipitação normal atinge 1800 mm anuais.

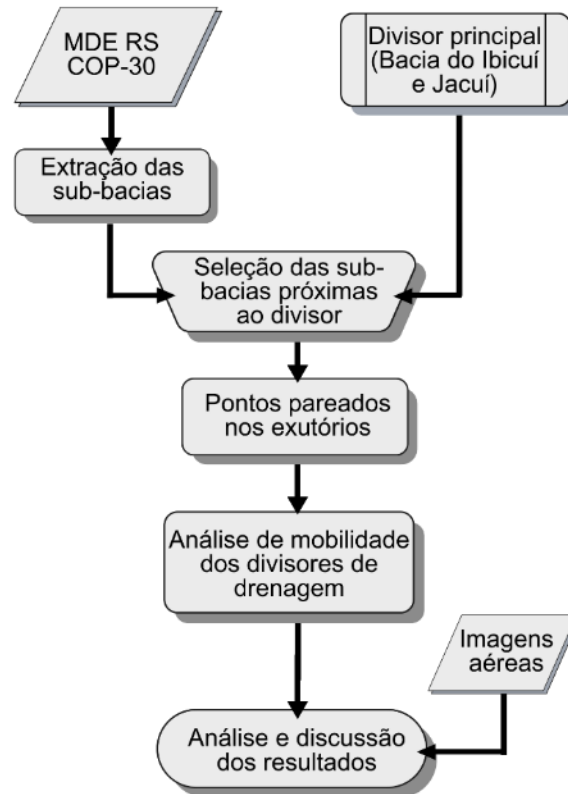
Segundo a Fundação Estadual de Proteção Ambiental – FEPAM (RIO GRANDE DO SUL, 2012), a bacia hidrográfica do Rio Jacuí possui uma área de 71.600 km². Sua área de drenagem é utilizada para uso intensivo do solo para agricultura, onde na porção norte predominam as culturas intensivas de soja e trigo através do sistema de cultura rotativa e na porção sul ocorre, além destas culturas, o cultivo do arroz e um incremento da pecuária. Esta bacia possui também instalações de aproveitamento energético em seu trecho superior.

O rio Jacuí tem suas principais nascentes localizadas no Planalto Meridional e o comprimento total aproximado é de 710 km. (RIO GRANDE DO SUL, 2012). A bacia do Jacuí é formada pelas áreas de drenagem do Vacacaí, Vacacaí-Mirim, Pardo, Taquari, Antas e o próprio Jacuí, além de outros mananciais de ordem inferior. Contrariamente ao rio Ibicuí, o rio Jacuí desagua no lago Guaíba, com fluxo em direção a Laguna dos Patos e para o Oceano Atlântico.

6.2.2 Delimitação da rede de drenagem e sub-bacias hidrográficas a partir do MDE

Os tópicos abaixo detalham os procedimentos para a extração das sub-bacias hidrográficas estudadas, bem como para a aplicação da análise de mobilidade e estabilidade nestas sub-bacias. A Figura 10 apresenta a cadeia de processamentos para alcançar este propósito.

Figura 10 - Fluxograma dos processamentos para a análise de mobilidade e estabilidade dos divisores de drenagem.



Fonte: Elaborado pela autora.

A utilização de MDE foi necessária para a extração da rede de drenagem e delimitação das sub-bacias associadas, como também para a obtenção dos índices utilizados para a análise de mobilidade dos divisores. O MDE utilizado foi o Copernicus DEM (COP-DEM), já que estudos prévios, inclusive nesta dissertação, apontam que este é o MDE com melhor qualidade altimétrica disponível gratuitamente em comparação com outros MDEs de resolução espacial de 30 m (GUTH e GEOFFROY, 2021; PURINTON e BOOKHAGEN, 2021). Com base no aplicativo TopoToolbox (SCHWANGHART e SCHERLER, 2014) e no pacote Topographic Analysis Kit Master – TAK (FORTE e WHIPPLE, 2019) implementados no Matlab foi extraída a rede de drenagem do Estado do RS utilizando uma área de contribuição de 1×10^6 (1.000.000 m²) de acordo com testes prévios visuais.

A rede de drenagem foi utilizada como entrada para a extração das sub-bacias de 4^a e 5^a ordens. Sub-bacias de ordenamento inferiores não foram utilizadas neste estudo, pois não foram encontradas amostras de cabeceiras suficientes para realizar a análise de migração / estabilidade de divisores de drenagem. As sub-bacias foram

usadas como base para se analisar a dinâmica regional de migração do interflúvio principal das bacias dos rios Ibicuí e Jacuí. Após a extração da rede de drenagem e sub-bacias associadas foi feita uma seleção manual das sub-bacias de interesse. Nesta etapa, foram selecionadas principalmente as sub-bacias que ocorreram próximas ao divisor principal das bacias dos rios Ibicuí e Jacuí. Para as sub-bacias hidrográficas selecionadas coletaram-se pontos nos seus exutórios para seguir com as análises semiautomáticas de mobilidade dos divisores de drenagem, conforme descrito na sequência.

6.2.3 Análise de mobilidade dos divisores de drenagem

Os dados de sub-bacias hidrográficas foram carregados no *software* Matlab, juntamente com os pontos coletados nos exutórios das sub-bacias, os quais foram nomeados de modo pareado (i.e., 1-2, 3-4, 5-6, etc.) para que o algoritmo identificasse quais sub-bacias compõem um mesmo divisor. Com auxílio do pacote DivideTools (FORTE E WHIPPLE, 2019) através das funções “*Divide Stability*” e “*AcrossDivide*” foi feita a análise pareada de estabilidade / mobilidade dos divisores de drenagem. Isto foi feito a partir da análise comparativa entre os valores da métrica χ (WILLETT *et al.*, 2014) e das métricas de Gilbert (i.e., elevação, amplitude e declividade; FORTE e WHIPPLE, 2019; WHIPPLE *et al.*, 2018) extraídos a partir de um conjunto de cabeceiras localizadas em ambos os lados do divisor de drenagem.

A maior taxa de erosão da bacia agressora impulsiona a migração dos divisores de drenagem (WHIPPLE, *et al.* 2017). Segundo Forte e Whipple (2019) os divisores se moverão quando as taxas de erosão não forem iguais em ambos os lados do divisor. A diferença na taxa de erosão provavelmente será impulsionada por diferenças no gradiente topográfico em ambos lados do divisor. Quanto a direção de mobilidade as métricas de elevação e χ se comportam do modo que o divisor vai se mover dos valores mais baixos para os valores mais altos. O contrário para as métricas amplitude ou declividade, ou seja, o divisor vai se mover dos valores mais altos para os valores mais baixos (FORTE e WHIPPLE, 2019).

A definição de estabilidade de um divisor ou não, se deu pela análise do grau de sobreposição ou separação entre as principais estatísticas (i.e., média e desvio

padrão) das métricas topográficas avaliadas para cada lado do divisor de drenagem. O divisor de drenagem é considerado estável quando os valores médios de χ e/ou das métricas de Gilbert de um lado do divisor sobrepuseram os valores de desvio padrão do outro lado do divisor (cf. FORTE e WHIPPLE, 2019); caso contrário, o divisor foi considerado móvel. Esta análise também permitiu classificar a direção / orientação em que o divisor está se movendo, nos casos de divisores móveis.

Os divisores de drenagem também foram analisados quanto ao grau de mobilidade, em que eles foram classificados com valores no intervalo de 0 a 4 (Tabela 4). Para o divisor que não obteve mobilidade em nenhuma das métricas avaliadas atribuiu-se o valor zero (divisor estável, sem mobilidade); o divisor que obteve mobilidade em apenas uma das métricas atribuiu-se o valor 1 (mobilidade baixa); o divisor que teve mobilidade em duas métricas atribuiu-se o valor 2 (mobilidade moderada); o divisor que teve mobilidade em três métricas atribuiu-se o valor 3 (mobilidade alta); e para o divisor que teve mobilidade nas quatro métricas atribuiu-se o valor 4 (mobilidade muito alta), sendo, portanto, considerado o mais propício a sofrer migração e eventual processos de capturas fluviais.

Tabela 4 - Grau de mobilidade dos divisores de sub-bacias de 4^a e 5^a ordens.

Número de métricas indicando mobilidade	Valor atribuído	Descrição
Nenhuma métrica	0	Divisor estável, sem mobilidade
Uma métrica	1	Mobilidade baixa
Duas métricas	2	Mobilidade moderada
Três métricas	3	Mobilidade alta
Quatro métricas	4	Mobilidade muito alta

Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.4 Dados de campo

Através da análise do grau de mobilidade dos divisores de drenagem foram delimitados pontos de interesse para serem visitados em campo. Em campo, realizaram-se anotações sobre o terreno observado e voos para a coleta de imagens aéreas oblíquas, visando observar e investigar as feições erosivas que ocorrem na região. Sendo assim, foram delimitadas 17 áreas de interesse, onde a altura máxima de captura de imagens foi 120 m. O instrumento utilizado para coleta de imagens foi

um Veículo Aéreo Remotamente Pilotado (VARP) DJI Phantom 4 PRO que é um equipamento multirrotor leve e de pequena dimensão, com peso aproximado de 1,5 kg. O mesmo transportou um sensor CMOS de 20 megapixels e distância focal nominal de 24 mm, que permitiu a aquisição de imagens referentes à faixa espectral do visível, com comprimentos de onda variando de 490 a 665 nm (i.e., bandas do azul, verde e vermelho), bem como produzir composições coloridas R3G2B1. Além das imagens, coletaram-se pontos no terreno com um receptor GPS modelo Garmin EtrexHcx. Esses dados foram posteriormente inseridos em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

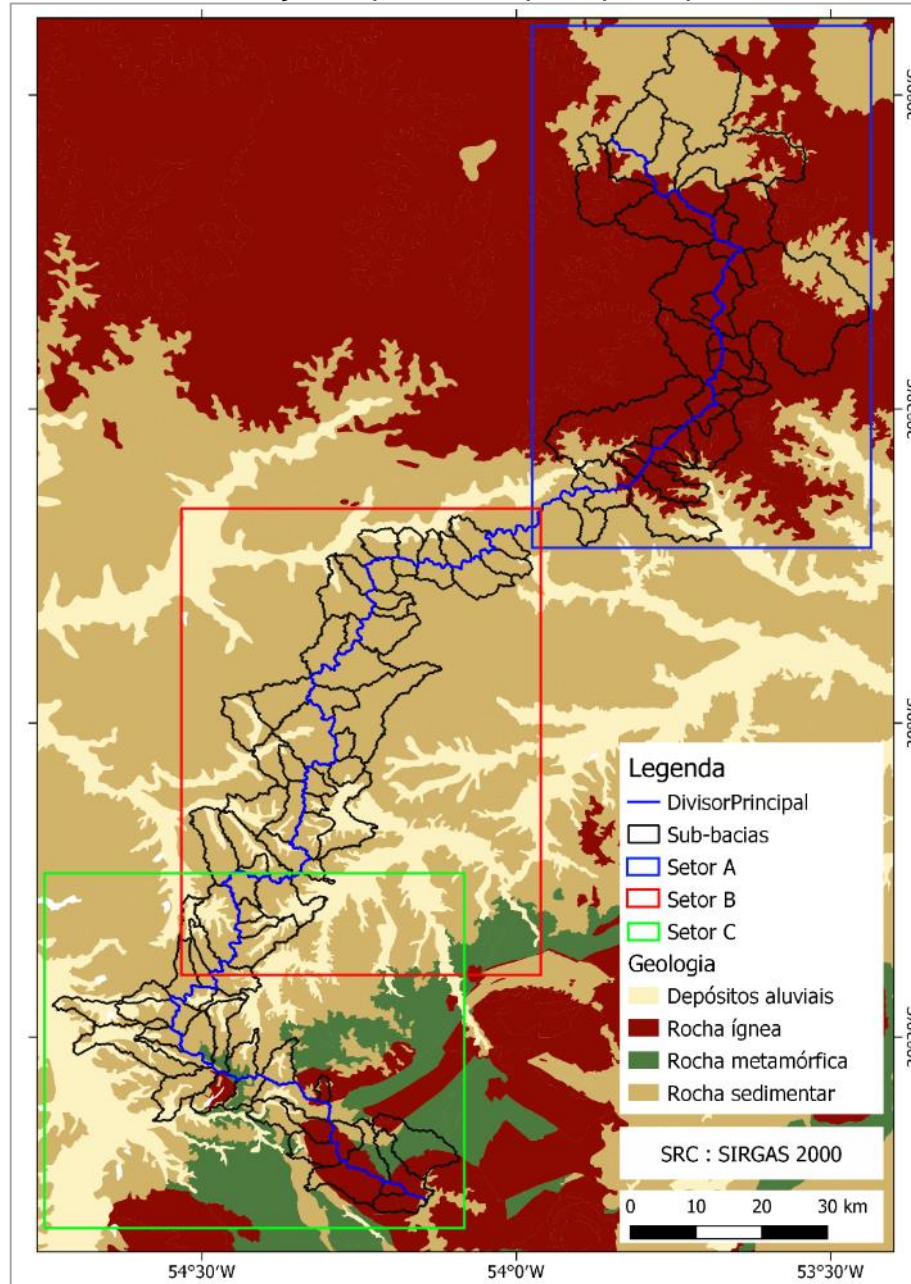
6.3 Resultados

Através dos procedimentos semiautomáticos realizados sobre o MDE obtiveram-se um conjunto de sub-bacias que compõem o divisor principal Ibicuí-Jacuí e analisaram-se a dinâmica atual de estabilidade e mobilidade dessas sub-bacias. Na sequência, apresenta-se uma caracterização geral das sub-bacias estudadas e os resultados com a análise de estabilidade / mobilidade das sub-bacias com base na métrica χ e nas métricas de Gilbert.

6.3.1 Caracterização das sub-bacias hidrográficas

Após a extração das sub-bacias (ordens quatro e cinco) que ocorrem ao longo do divisor principal dos rios Ibicuí e Jacuí foi realizada uma filtragem dos dados para eliminar aquelas muito pequenas e com poucas cabeceiras de drenagem. Isto foi feito a fim de obter um conjunto amostral mais significativo estatisticamente para a análise de mobilidade do divisor principal. No caso das sub-bacias de 5ª ordem, selecionaram-se 32 sub-bacias com área média de 110 km² para seguir com a análise de mobilidade. Essas sub-bacias englobam um total de 24 divisores de drenagem. Já para as sub-bacias de 4ª ordem foram obtidas 87 sub-bacias com área média de 22 km², resultando em um total de 60 divisores. A localização das sub-bacias de 4ª e 5ª ordens e do divisor de drenagem principal em relação aos principais tipos de rocha desta região (i.e., sedimentares, metamórficas, ígneas e depósitos aluviais) é apresentada na Figura 11.

Figura 11 - Localização das sub-bacias de 5ª e 4ª ordens e o divisor de drenagem principal, incluindo a distribuição espacial dos principais tipos de rocha desta região.



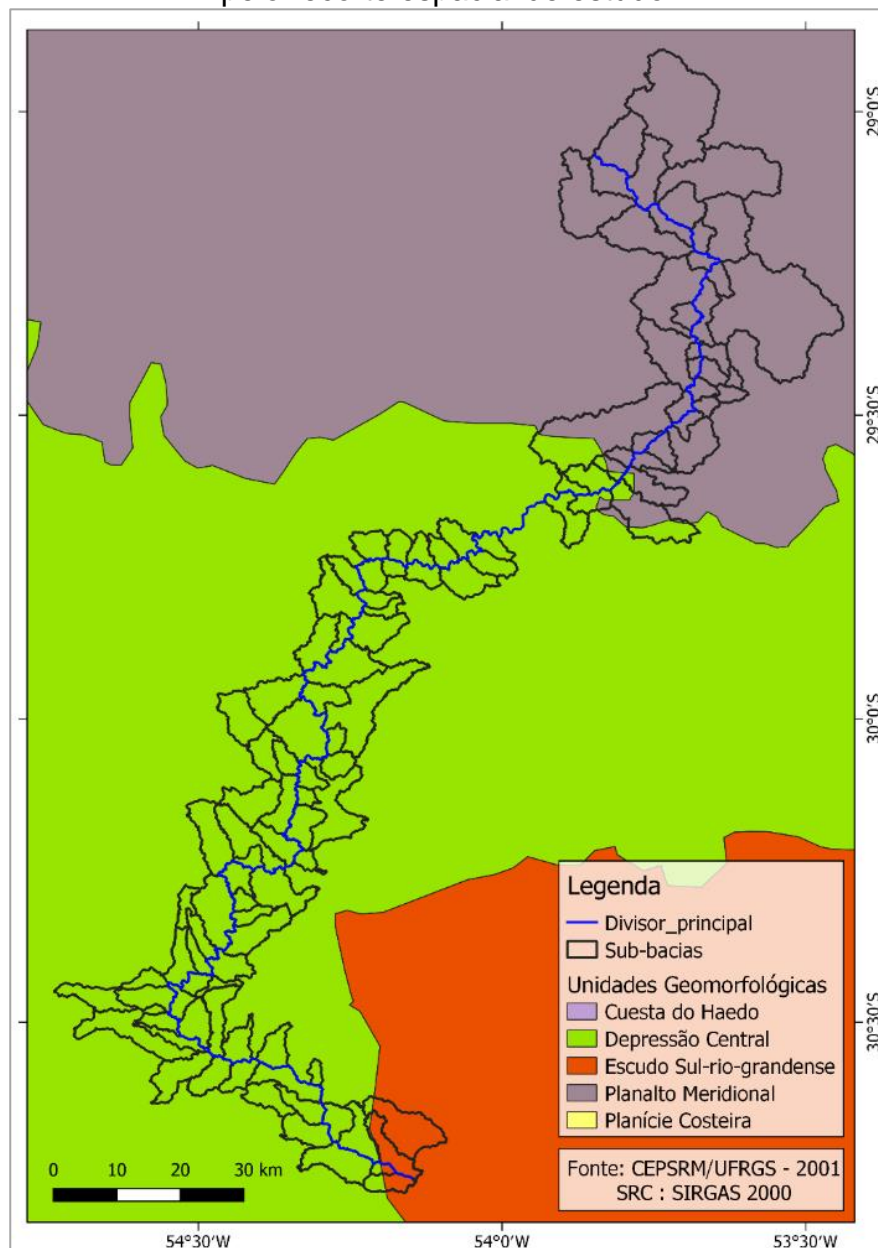
Fonte: Elaborado pela autora.

Através da Figura 11 é possível observar localização das sub-bacias hidrográficas sobre a geologia da região. Na porção norte do recorte espacial, as sub-bacias se desenvolvem sobre as litologias ígneas extrusivas representadas pelas unidades Caxias e Gramado, oriundas dos derrames basálticos da Formação Serra Geral (Apêndice A). Na porção central, as sub-bacias ocorrem essencialmente sobre rochas sedimentares areníticas e pelíticas, com predominância da Formação Pirambóia e Rio do Rastro (Apêndice A). Na porção sul, as sub-bacias ocorrem

localizadas predominantemente sobre unidades geológicas ígneo-intrusivas, como o Monzogranito Santa Rita, Granito Jaguari, complexo máfico-ultramáfico da unidade Cerro Mantiqueira e a unidade metavulcânica do Vacacaí (Apêndice A). De modo geral, as rochas ígneas (unidade Caxias) e sedimentares (Formação Pirambóia), ambas da Bacia do Paraná, têm maior representatividade nas sub-bacias de 5ª ordem, com 22% e 20%, respectivamente. Já para as sub-bacias de 4ª ordem predominam rochas sedimentares da Formação Pirambóia, com 20%.

Grande parte das sub-bacias ocorrem em terrenos pertencentes a unidade da Depressão Central (Depressão Periférica; Figura 12), que é composta predominantemente por solos desenvolvidos de rochas sedimentares. Para sul, as sub-bacias desenvolvem-se na unidade geomorfológica Escudo Sul-Rio-Grandense, composta por rochas plutônicas e metamórficas. Para norte, as sub-bacias ocorrem distribuídas sobre a unidade do Planalto Meridional, constituída por arenitos intercalados com basaltos. Essas sub-bacias de 4ª e 5ª ordens são as que ocorrem com maior frequência ao longo do interflúvio principal Jacuí-Ibicuí e foram selecionadas para conduzir a análise de estabilidade / mobilidade de divisores de drenagem.

Figura 12 – Unidades geomorfológicas de abrangência do divisor principal de drenagem (bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Jacuí) e as sub-bacias abrangidas pelo recorte espacial de estudo.

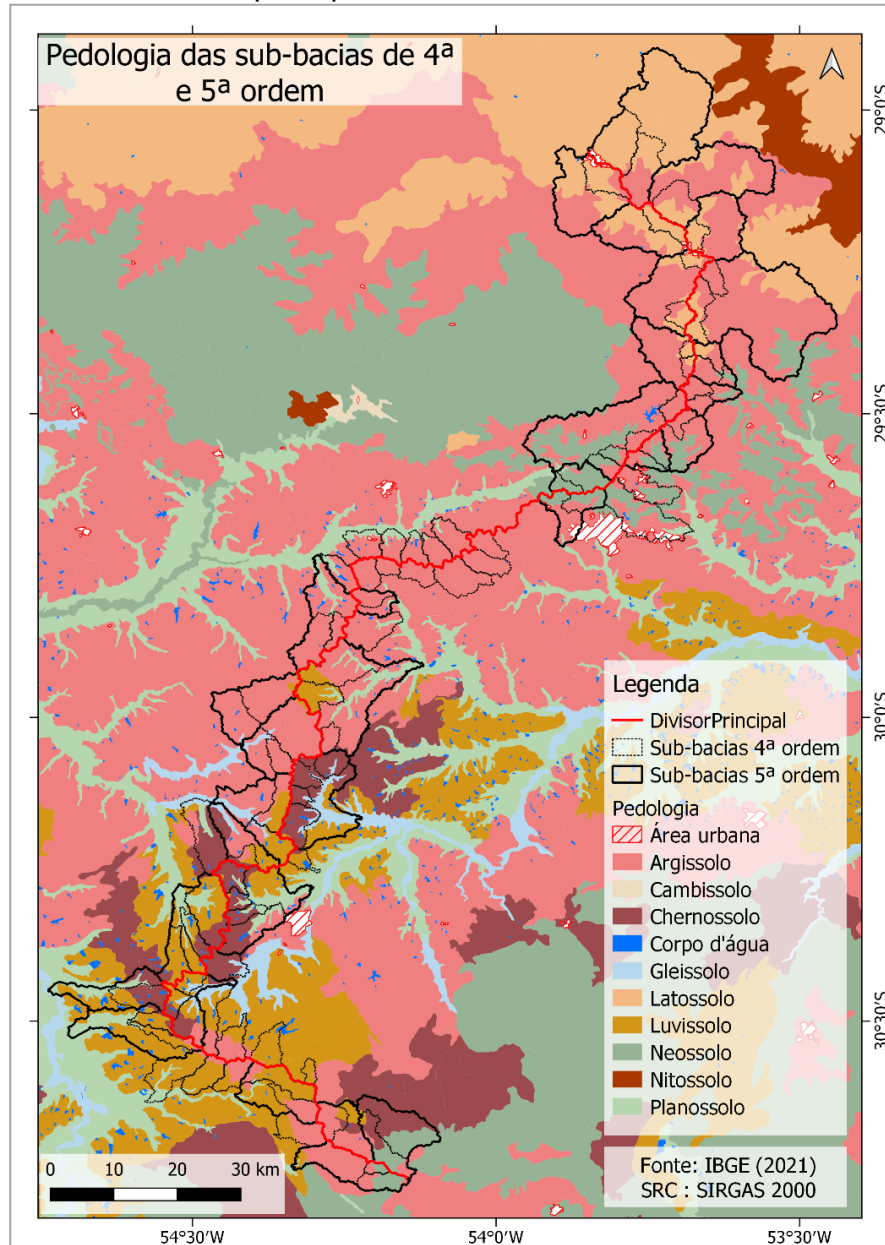


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 13 ilustra a distribuição espacial dos principais tipos de solos que ocorrem nas sub-bacias hidrográficas. Na porção norte da área de estudo, ambas as sub-bacias registram o predomínio de solos do tipo Argissolo Vermelho, Latossolo Vermelho, e secundariamente, Neossolo Litólico. Na porção central ocorrem solos do tipo Argissolo Vermelho, Luvisolo Háplico e Chernossolo Ebânico. Na porção Sul ocorrem as classes Neossolo Litólico, Chernossolo Argilúvico e Argissolo vermelho-Amarelo. De modo geral, a maior parte das sub-bacias de 5ª ordem (40 %) e quatro (32 %) são constituídas por Argissolo Vermelho com alto teor de alumínio.

A segunda maior ocorrência é o Latossolo Vermelho (17%) e o Luvisso solo Háplico (18%) para as sub-bacias de 5ª e 4ª ordem, respectivamente.

Figura 13 - Distribuição espacial das sub-bacias hidrográficas de 4ª ordem e suas principais classes de solos.



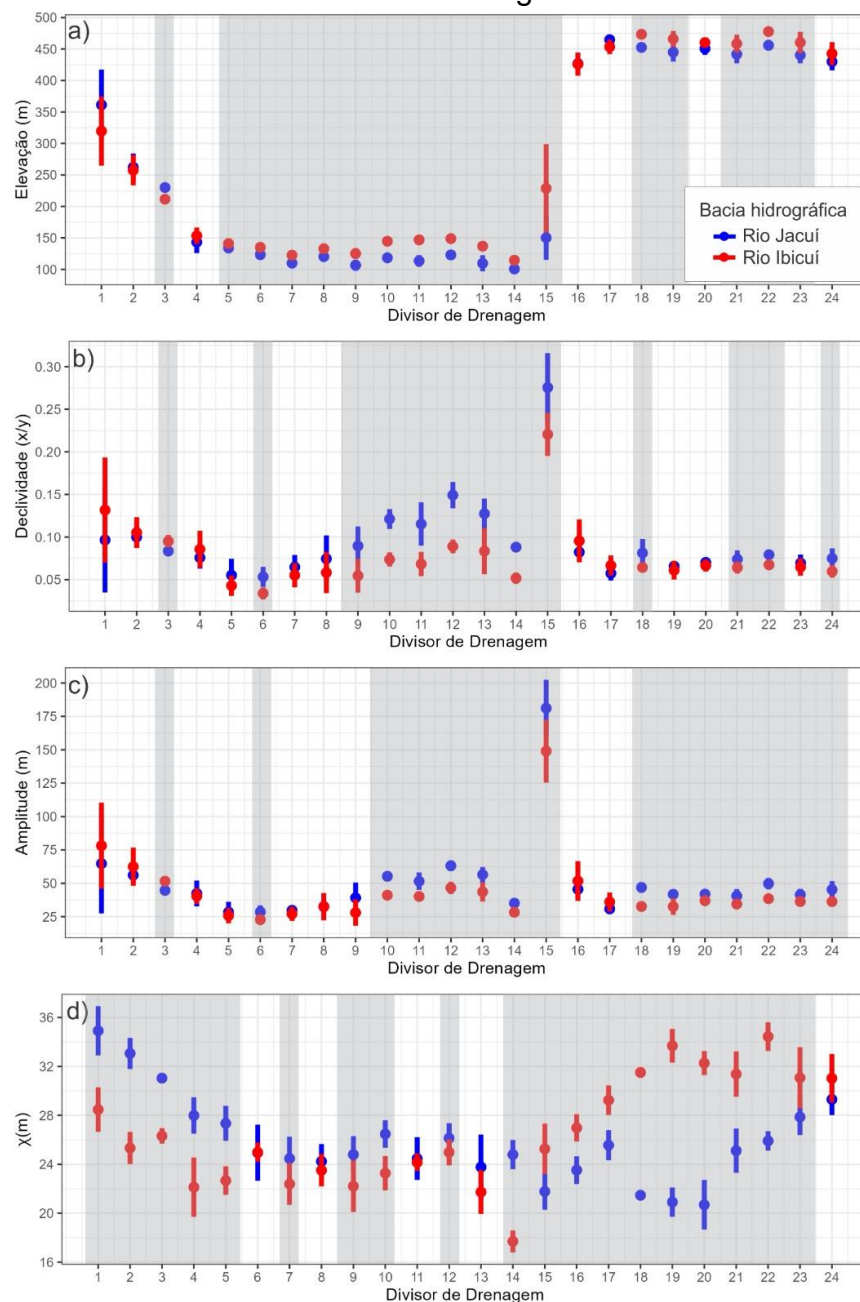
Fonte: Elaborado pela autora com dados do IBGE (2021).

6.3.2 Descrição da análise de mobilidade e estabilidade dos divisores de drenagem

Dos 24 divisores de drenagem constituídos por sub-bacias de 5ª ordem (Figura 14) analisados e sugeridos como móveis, 17 (70,83%) foram apontados pela métrica elevação; 13 (54,17%) pela métrica declividade; 15 (62,50%) pela amplitude; e 19

(79,17%) pela métrica χ . Portanto, no caso das sub-bacias de 5ª ordem, das quatro métricas topográficas avaliadas a métrica χ foi a que apontou o maior número de divisores móveis e a declividade o menor. No geral, apenas 8 divisores tiveram mobilidade nas quatro métricas estudadas.

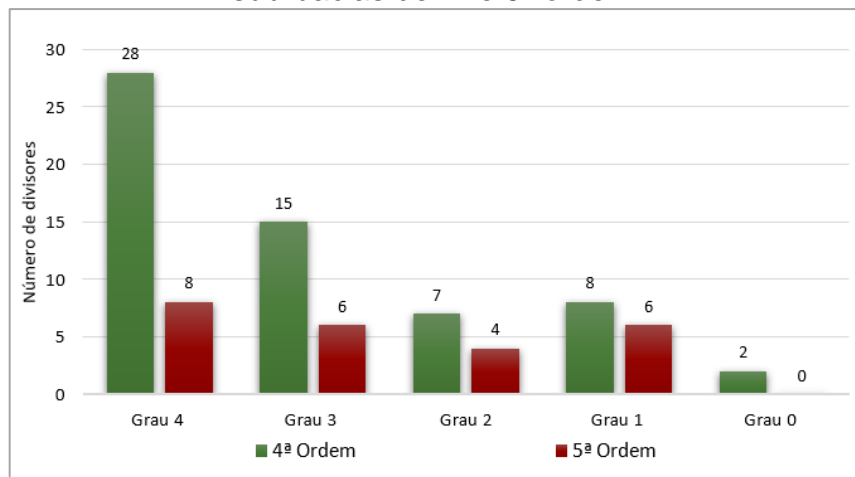
Figura 14 - Gráfico de barras de erros com os valores médios e de desvio padrão das métricas topográficas extraídas para os divisores de drenagem de 5ª ordem fluvial (divisores 1-24). (a-d) Elevação (a), declividade (b), amplitude (c) e χ (d). Faixas em cinza indicam divisores móveis. Cores azul e vermelho representam os lados de cada divisor de drenagem analisado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base na análise do grau de mobilidade dos divisores das sub-bacias de 5ª ordem, constatou-se que a maioria dos divisores (58%) indicam mobilidade muito alta ou alta (graus 3 e 4). Observou-se, ainda, que nenhum dos divisores extraídos das sub-bacias desta ordem são estáveis (i.e., grau 0), o que indica que os divisores apresentaram mobilidade em pelo menos uma das quatro métricas topográficas analisadas. Observando as barras de erros obtidas, no caso das sub-bacias de 5ª ordem, dos 24 divisores que foram testados, constatou-se que há mobilidade muito alta (grau quatro) em oito deles (Figura 15).

Figura 15 - Síntese do grau de mobilidade dos divisores de drenagem extraídos de sub-bacias de 4ª e 5ª ordem.



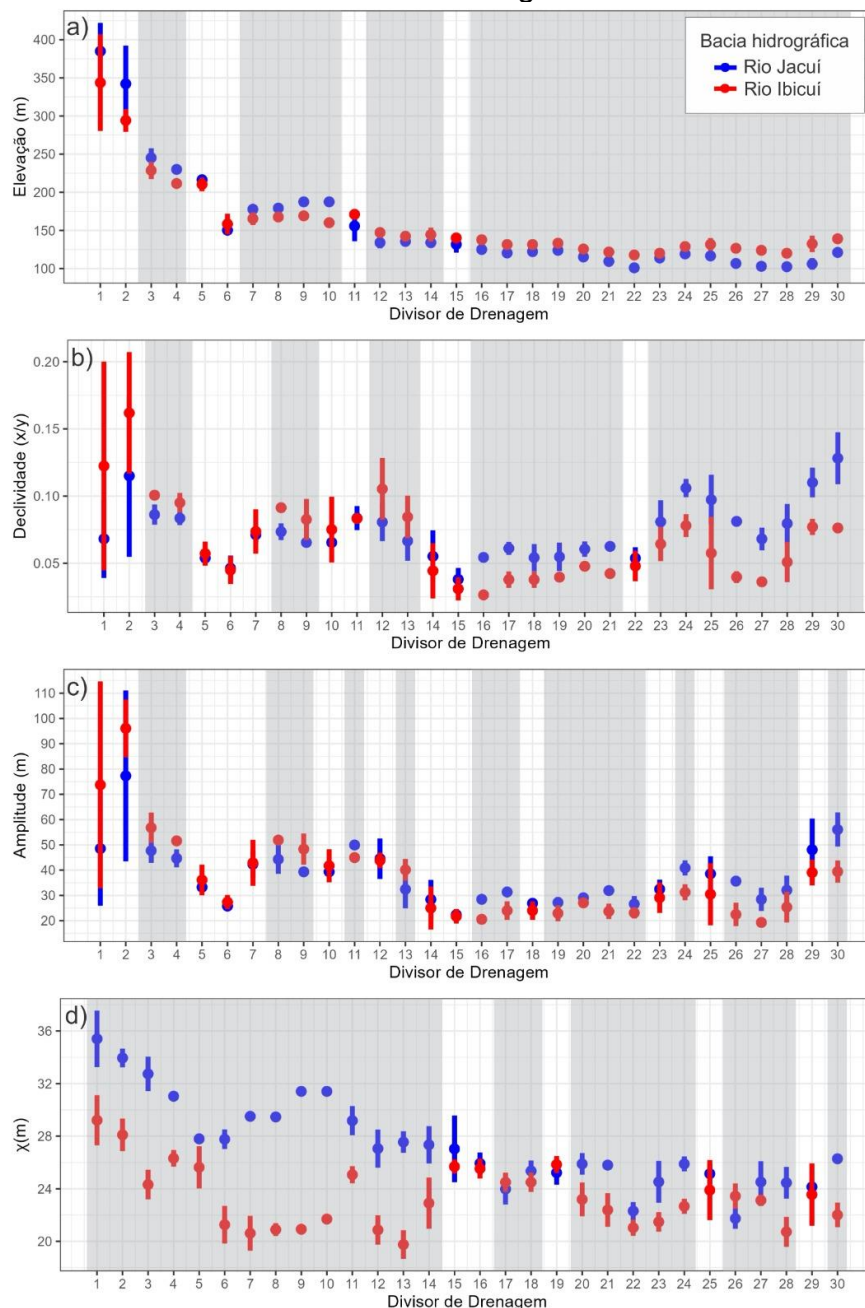
Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando o grau de mobilidade para as sub-bacias de 4ª ordem, observou-se que dos 60 divisores estudados, 72% são de grau quatro e três, indicando que há alta taxa de mobilidade na região estudada (Figura 15). Observa-se também que há dois divisores estáveis (i.e., grau 0), ou seja, sem nenhuma evidência de contrastes nos valores das métricas topográficas, embora tenha se analisado um número restrito de cabeceiras. É importante destacar que a análise das sub-bacias de 4ª ordem fluvial considerou um menor número de cabeceiras de drenagem, devido ao menor comprimento desses divisores.

Dos 60 divisores de drenagem formados por sub-bacias de 4ª ordem (Figuras 16 e 17), 47 (78,33%) divisores de drenagem foram sugeridos como sendo móveis para a métrica elevação; 42 (70%) divisores para a métrica declividade; 41 (68,33%) divisores para a amplitude; e 49 (81,66%) divisores para a métrica χ . Similar aos divisores das sub-bacias de 5ª ordem fluvial, as métricas χ e

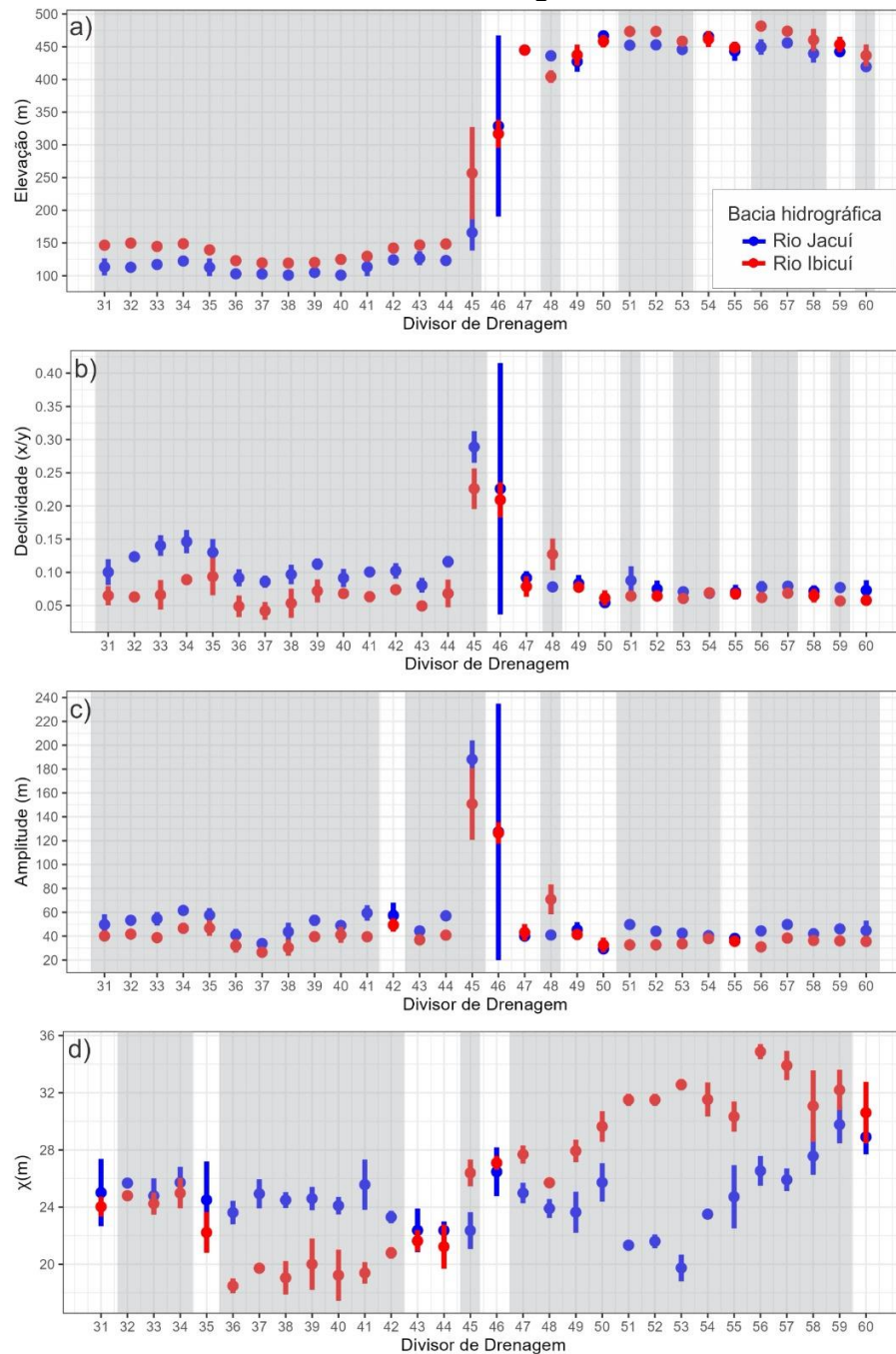
elevação foram as que apontaram o maior número de divisores móveis, enquanto a métrica amplitude o menor número de divisores. De modo geral, 28 divisores tiveram mobilidade nas quatro métricas estudadas. Ainda se nota que há uma migração bidirecional das bacias estudadas, porém há o predomínio avanço da bacia do Jacuí em direção a bacia do Ibicuí.

Figura 16 - Gráfico de barras de erros com os valores médios e de desvio padrão das métricas topográficas extraídas para os divisores de drenagem de 4ª ordem fluvial (divisores 1-30). (a-d) Elevação (a), declividade (b), amplitude (c) e χ (d). Faixas em cinza indicam divisores móveis. Cores azul e vermelho representam os lados de cada divisor de drenagem analisado.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 - Gráfico de barras de erros com os valores médios e de desvio padrão das métricas topográficas extraídas para os divisores de drenagem de 4ª ordem fluvial (divisores 31-60). (a-d) Elevação (a), declividade (b), amplitude (c) e χ (d). Faixas em cinza indicam divisores móveis. Cores azul e vermelho representam os lados de cada divisor de drenagem analisado.

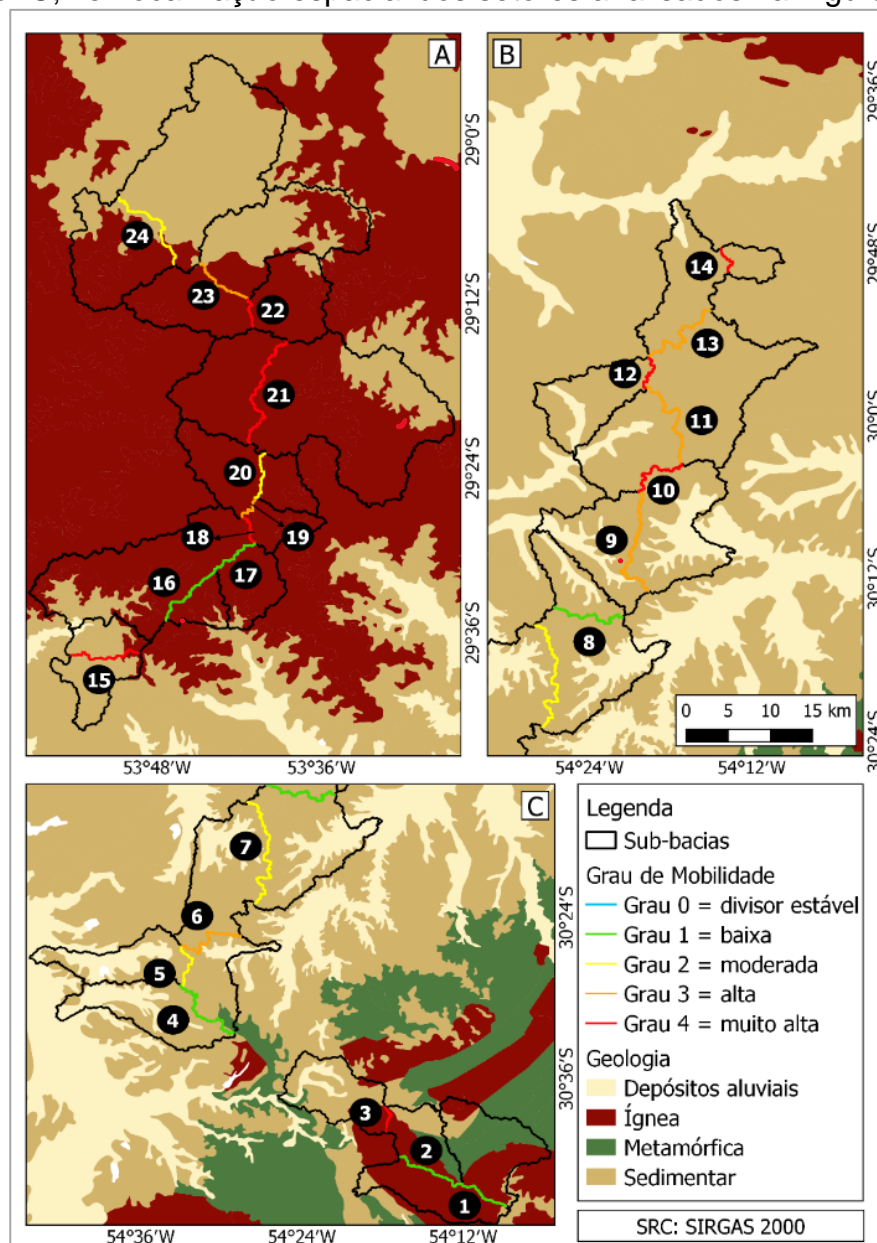


Fonte: Elaborado pela autora.

A distribuição geográfica dos divisores referentes as sub-bacias de 5ª ordem com seus respectivos graus de mobilidade pode ser visto na Figura 18. Observa-se que dos três setores analisados (Figura 11), os setores A e B foram os que

apresentaram o maior número de divisores com grau de mobilidade muito alto. O setor C apresentou apenas 1 divisor com mobilidade de grau quatro, enquanto que para o setor B observou-se que dos 7 divisores analisados, 6 apresentaram mobilidade variando nos graus três e quatro.

Figura 18 - Distribuição espacial dos divisores de drenagem das sub-bacias de 5ª ordem com seus respectivos graus de mobilidade, incluindo a distribuição dos principais tipos de rochas. A-C) Setores analisados (A = Setor A; B = Setor B e C = Setor C; ver localização espacial dos setores analisados na Figura 11).

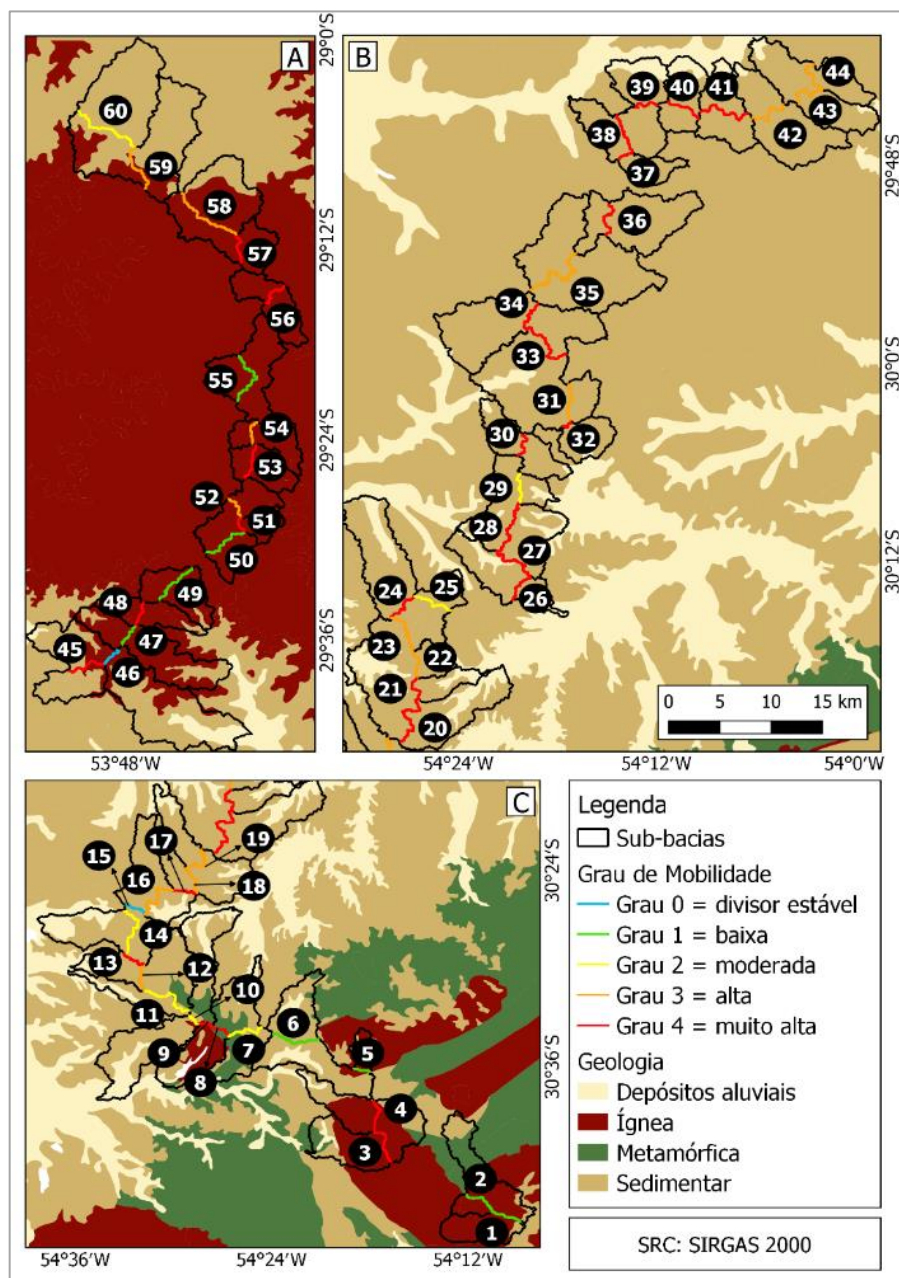


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 19 ilustra a localização das sub-bacias de 4ª ordem com seus respectivos graus de mobilidade nos três setores analisados (Figura 11). Observa-se

que dos 24 divisores analisados no setor B, 22 apresentam grau de mobilidade alto e muito alto neste setor, evidenciando um grau considerável de mobilidade em comparação com os setores A e C.

Figura 19 - Distribuição espacial dos divisores de drenagem das sub-bacias de 4ª ordem com suas respectivas classes de grau de mobilidade, incluindo a localização dos principais tipos de rocha. A-C) Setores analisados (A = Setor A; B = Setor B e C = Setor C; ver localização espacial dos setores analisados na Figura 11).

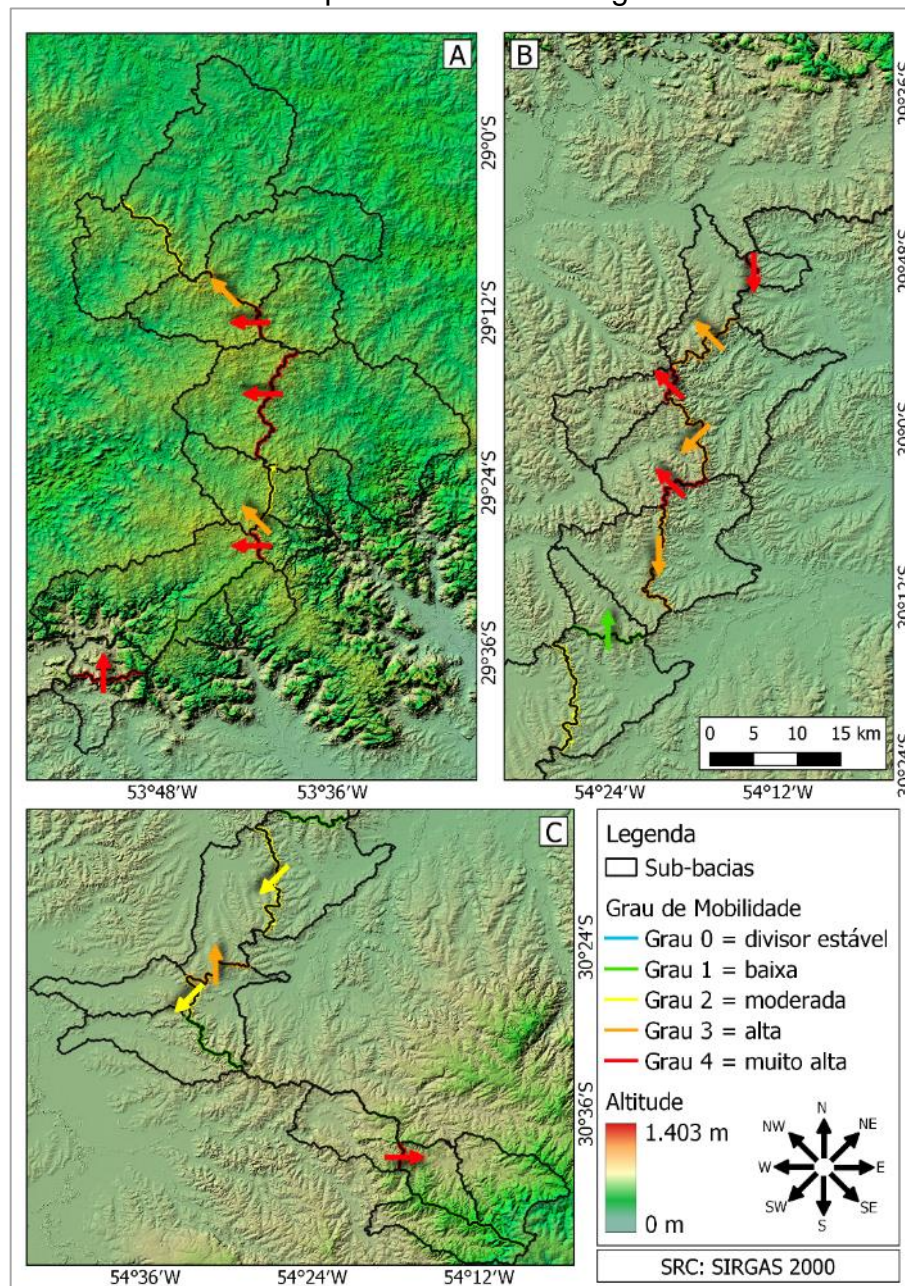


Fonte: Elaborado pela autora.

A direção de mobilidade dos divisores analisados pode ser observada nas Figuras Figura 20 Figura 21. A direção foi inferida com base na métrica elevação,

uma vez que esta se configura no dado elementar para o cálculo das demais métricas topográficas e por ter apresentado uma distribuição de valores mais homogênea e menos ruidosa em relação às demais métricas topográficas avaliadas neste estudo (ver Figura 14, Figura 16 e Figura 17). A análise da direção de mobilidade regional dos divisores de drenagem das sub-bacias de 5ª ordem (Figura 20) indica que a maior parte das sub-bacias está avançando principalmente para as direções noroeste e sudoeste em direção a bacia do rio Ibicuí, e secundariamente, para a direção oeste.

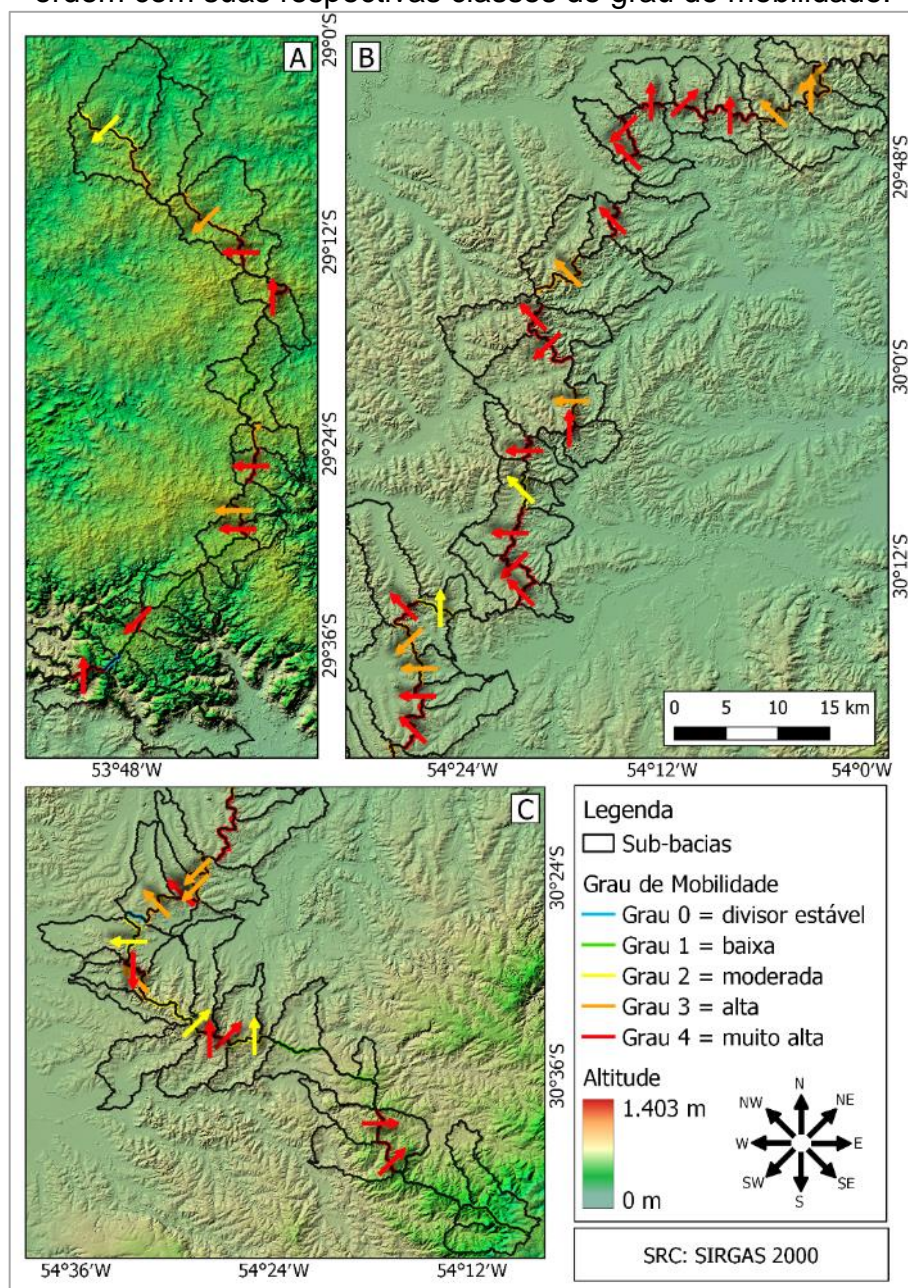
Figura 20 - Direção de mobilidade dos divisores de drenagem das sub-bacias de 5ª ordem com suas respectivas classes de grau de mobilidade.



Fonte: Elaborado pela autora.

De forma similar as sub-bacias de 5ª ordem, dos 60 divisores de drenagem estudados para as sub-bacias de 4ª ordem, observa-se que há um avanço expressivo das sub-bacias nas direções noroeste e norte principalmente, e, secundariamente, para oeste, porém ambas em direção a bacia do rio Ibicuí (Figura 21).

Figura 21 - Direção de mobilidade dos divisores de drenagem das sub-bacias de 4ª ordem com suas respectivas classes de grau de mobilidade.

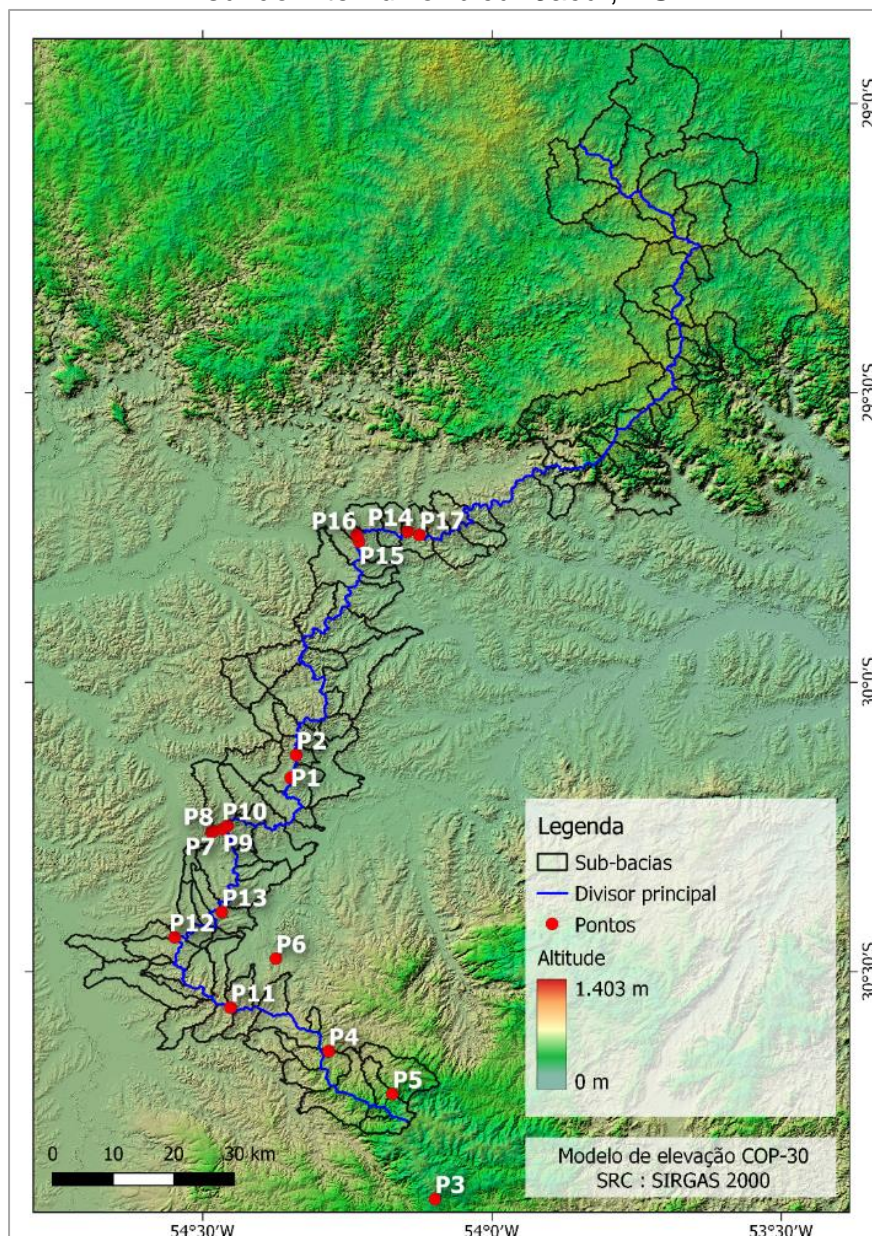


Fonte: Elaborado pela autora

6.3.3 Descrição dos dados obtidos em campo

Os 17 pontos (P1-P17) visitados em campo podem ser observados na Figura 22. Para os pontos P6 e P3 foram realizadas descrições do relevo em campo (sem a captura de imagens aéreas) já que no local ocorreram feições expostas que são de interesse para validar os resultados obtidos com a análise de migração dos divisores de drenagem.

Figura 22 – Localização dos pontos (P1-P17) visitados em campo na região centro-sul do interflúvio Ibicuí-Jacuí, RS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com as imagens aéreas obtidas nos determinados locais P1, P2, P7, P8, P9, P10, P14, P15, P16, P17 (Figura 22), foi possível observar feições que não eram tão evidentes em produtos de sensoriamento remoto (e.g., mapeamentos regionais, imagens de satélites ópticas e MDEs), com resolução espacial moderada. Esse é o caso do ponto P1, onde encontra-se o divisor de número 28 (Figura 19). Este divisor está se movendo para oeste e possui mobilidade muito alta (grau quatro; Figura 21). Esta dinâmica de migração ficou evidente nas imagens aéreas obtidas para esse local (Figura 23A/B), onde se observa um contraste entre a densidade de drenagem em ambos os lados do divisor.

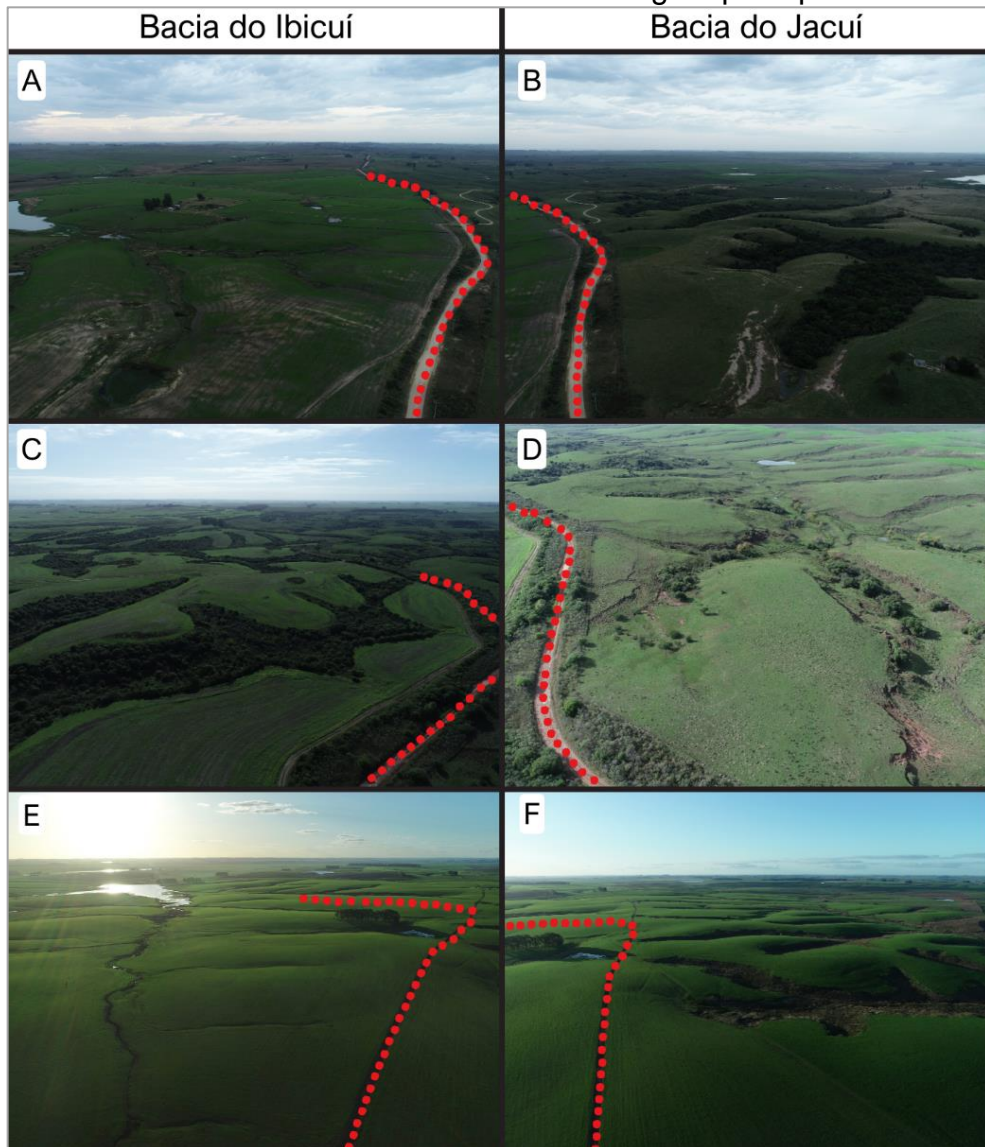
Essa diferença morfológica também pode ser observada no MDE deste setor (Figura 24A/B), onde é possível observar diferenças topográficas significativas em ambos os lados do divisor. Enquanto um setor da bacia do Ibicuí aparece com pouca vegetação e topografia mais plana (Figura 23A), o setor da bacia do Jacuí apresenta maior volume de vegetação na área de drenagem e topografia mais acidentada (Figura 23B). É possível perceber ainda alguns locais com cicatrizes de erosão, forte indicativos de que o divisor do lado da bacia do Jacuí está avançando para o lado da bacia do Ibicuí. A diferença em termos de dissecação na topografia das duas bacias continua sendo observada ao longo do divisor, ficando mais evidente na direção norte do ponto P2, como pode ser observado na Figura 24B.

Outro exemplo é o ponto P9, localizado no divisor de número 24 das sub-bacias de 4ª ordem (Figura 19). Este divisor está se movendo para noroeste e também possui mobilidade muito alta (grau quatro; ver Figura 21). A Figura 23C/D apresenta duas imagens aéreas do local. Observa-se que o lado da bacia do Ibicuí possui maior vegetação (Figura 23C) e rede de drenagem mais desenvolvida em comparação com o lado da bacia do Jacuí (Figura 23D), que apresenta menor volume de vegetação, porém com evidências de erosão ao longo dos canais de drenagem. Assim como no divisor de número 28, o divisor de número 24 (ponto P9) também está com indicativos de migração para a porção oeste, ou seja, na direção da bacia do Ibicuí. A análise visual da hipsometria deste setor corrobora a diferença na topografia, onde a bacia do Ibicuí apresenta uma topografia relativamente mais suave em relação a bacia do Jacuí (Figura 24C).

O ponto P13 localiza-se no divisor de número 19 das sub-bacias de 4ª ordem (Figura 19), sendo classificado com mobilidade alta (grau três), com direção de migração para sudoeste. Observando imagens áreas deste local (Figura 23E/F), notou-se que no lado da bacia do Ibicuí (Figura 23E) ocorre uma topografia e rede de drenagem mais suave em relação a bacia do Jacuí (Figura 23F) onde há uma topografia mais acidentada, com vales mais profundos, e potencialmente mais erosivos, visto as evidências de cicatrizes de erosão ao longo da rede de drenagem. A hipsometria do local (Figura 24D) também mostra diferenças morfológicas significativas na topografia, com feições morfológicas mais acentuadas e desenvolvidas para o lado da bacia do Jacuí, reforçando a hipótese de migração para em direção a bacia do Ibicuí.

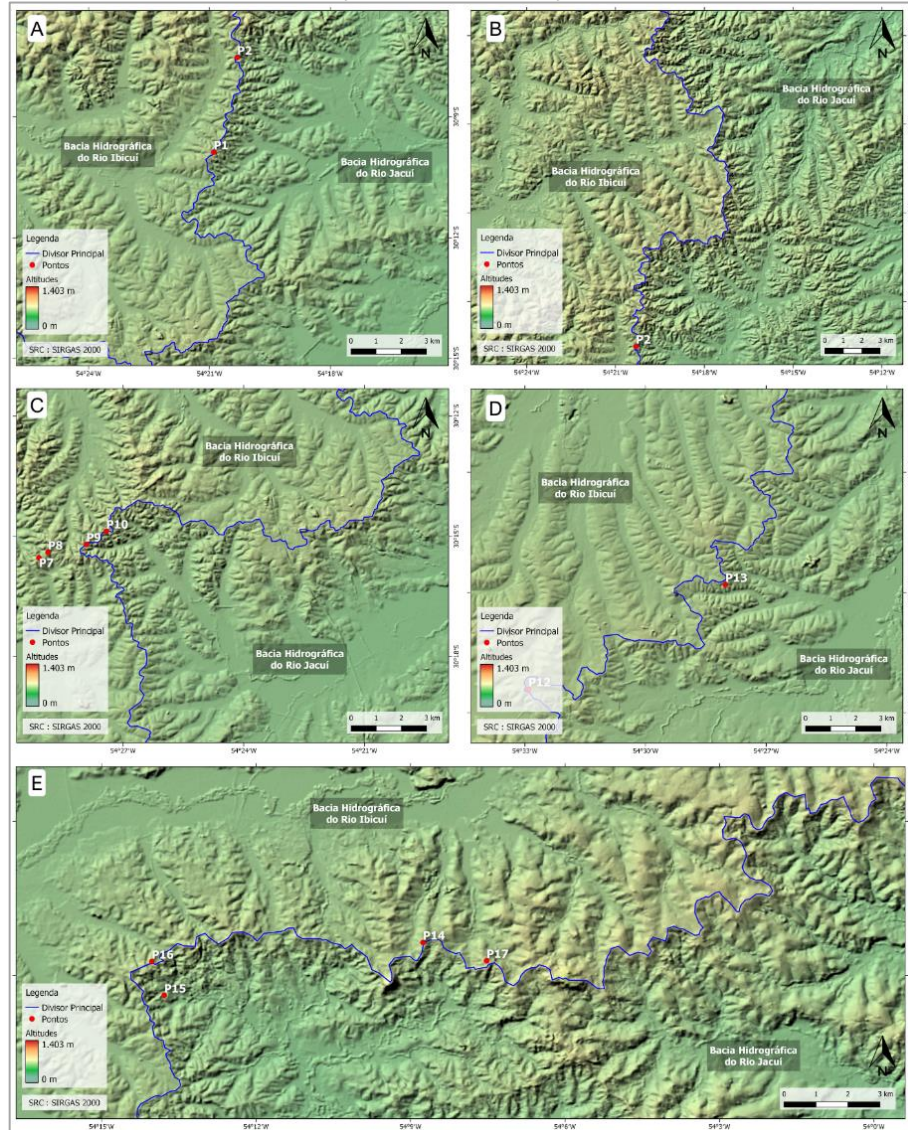
As regiões dos pontos P14 e P17 localizados no divisor nº 38, e dos pontos P15 e P16 localizados no divisor 41, ambos das sub-bacias de 4ª ordem (Figura 19) indicaram mobilidade muito alta (grau quatro). Evidências dessa mobilidade incluem feições morfológicas mais acentuadas e desenvolvidas para o lado da bacia do Jacuí (Figura 24E), com diferenças morfológicas significativas na topografia, reforçando a hipótese de migração para o lado da bacia do Ibicuí.

Figura 23 – Imagens aéreas coletadas dos pontos P1 (A e B), P9 (C e D) e P13 (E e F). Note os contrastes entre a rede de drenagem em ambos os lados do divisor. Setas vermelhas = divisor de drenagem principal.



Fonte: Imagens aéreas obtidas.

Figura 24 - Hipsometria da região dos pontos P1, P2, P7, P8, P9, P10, P13, P14, P15, P16 e P17. Note as diferenças de dissecação em ambos os lados do divisor.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.4 Discussão

Os resultados obtidos com a análise de estabilidade / mobilidade dos divisores de drenagem a partir das métricas analisadas (Figura 14, Figura 16, Figura 17) indicam que há processos de migração em curso na área de estudo, independente da ordem fluvial das sub-bacias avaliadas, e que essa mobilidade ocorre principalmente na porção central, ou seja, a área mais baixa da região, sendo que a maior parte dos divisores móveis são da bacia do Jacuí. Em todos os casos analisados, se verificou

que a métrica χ foi a que apresentou os resultados mais dispersos na análise de migração de divisores, sem um padrão evidente na distribuição dos valores das métricas. Isto pode ser explicado pelo fato do uso da métrica χ não ser tão confiável em paisagens transientes, onde ocorre um desequilíbrio entre as taxas de erosão e soerguimento (FORTE e WHIPPLE, 2019; WHIPPLE *et al.*, 2018), como hipotetizado para o caso da área de estudo. Por outro lado, as métricas de Gilbert analisadas aqui foram mais eficientes, mostrando um padrão mais homogêneo e menos ruidoso na distribuição dos valores topográficos.

Levando em consideração apenas os divisores móveis das sub-bacias de 5ª ordem (Figura 18) e de 4ª ordem (Figura 19), observou-se que a região central e norte da área de estudo teve maior mobilidade, ou seja, contendo um maior número de sub-bacias com mobilidade nos graus principalmente quatro e três, e na porção sul da área de estudo os divisores estão mais estáveis, com predominância de mobilidade grau baixo ou moderado. A mobilidade pode ser inferida por diversos fatores (e.g., litoestrutura padrões climáticos, tectônicos e pela diferença entre a erodibilidade do leito fluvial) (SALGADO *et al.*, 2018; SORDI *et al.*, 2018). No caso da área de estudo, o mais provável é que a mobilidade esteja relacionada com os contrastes litológicos na área de estudo, ou seja, onde ocorrem terrenos com diferentes graus de erodibilidade.

Na porção central há predominância de rochas sedimentares (i.e., Formação Pirambóia e Rio do Rastro) que segundo Arcanjo (2011) são menos resistentes a erosão diferencial, por geralmente serem constituídas por arenitos de origem eólica e, além de arenitos também ocorrem rochas pelíticas, que são impermeáveis e pouco resistentes a erosão, tendo por consequência uma drenagem densa e erosão mais acelerada (ARCANJO, 2011). Segundo Salgado *et al.* (2018) rochas que são mais fracas diante ao intemperismo e erosões costumam não construir obstáculos para processos de captura fluvial. De acordo com Sordi *et al.* (2018) as taxas de denudação são aceleradas quando os rios começam a drenar as bacias sedimentares.

Na porção norte há predominância de Formação Caxias que são rochas ígneas extrusivas mais resistentes às ações de intemperismo, do que as rochas sedimentares que possuem menor resistência erosiva (ARCANJO, (2011). Esta porção teve variados graus de mobilidade, ainda sim com predominância de mobilidades muito alta e alta (i.e., graus 4 e 3), contudo essa mobilidade pode ser

explicada através do relevo, por ser uma área de transição entre o Planalto Meridional e a Depressão Central formada por escarpas erosivas. Outro fator importante, as altitudes são maiores na porção leste do Planalto Meridional diminuem em direção a oeste, fato também mencionado por Sordi *et al.* (2018) que as regiões com menores altitudes tendem a serem mais dissecados.

A região sul teve predomínio de sub-bacias com mobilidade baixa, ou seja, sub-bacias com mobilidade de grau 1, onde ocorrem diferentes tipos de granito e (i.e., Mozogranito Santa Rita e Granito Jaguarí), portanto, relevos com rochas mais resistentes a erosão, como relevos montanhosos como mencionado por Arcanjo (2011). Neste setor ocorrem rochas ígneas intrusivas, que são geralmente mais resistentes a erosão que as rochas sedimentares da porção central como mostram estudos prévios na região (PRÉMAILLON *et al.*, 2018).

Ao analisar a pedologia (Figura 13) foi observado que tanto para as sub-bacias de 5ª ordem quanto para as de 4ª ordem na porção norte e central da área de estudo, registram o predomínio de solos do tipo Argissolo Vermelho. Na porção Sul ocorrem principalmente as classes Neossolo Litólico e Chernossolo Argilúvico caracterizados por serem solos pouco profundos e localizado em relevos declivosos (EMBRAPA, 2006). Em geral, em toda a área de estudo o Argissolo Vermelho teve maior ocorrência, segundo Gomes (2019) tendem a ser mais erodíveis.

De modo geral, independente da ordem fluvial da sub-bacia analisada, a região central da área de estudo foi a que relevou a maior quantidade de sub-bacias com mobilidade de grau três (mobilidade alta) e quatro (mobilidade muito alta) em comparação com a região norte e a região sul. Observando os tipos de rocha da área de estudo (Apêndice A e B) observou-se que as regiões com maior mobilidade são aquelas que ocorreram sobre as litologias sedimentares da Bacia do Paraná. Porém, de forma complementar aos resultados obtidos com os dados de elevação digitais do MDE, uma análise futura de dureza da rocha será fundamental para comprovar tal processo na área de estudo. Além do fator litológico mencionado acima, a alta mobilidade das sub-bacias deste setor pode estar relacionada ainda com a distribuição altimétrica desta região. A região central está localizada na unidade geomorfológica da Depressão Central (Figura 12), onde as altitudes são mais baixas em relação aos demais setores estudados, o que pode facilitar a dinâmica de mobilidade entre sub-bacias.

Quanto a direção de mobilidade dos divisores analisados (Figura 20 e Figura 21), observou-se que a maioria dos divisores estão avançando em direção a bacia do rio Ibicuí, ou seja, as cabeceiras pertencentes a bacia do rio Jacuí estão avançando em direção à bacia do rio Ibicuí, com mecanismo evolutivo para oeste, semelhante ao observado por Sordi *et al.* (2018) na região da área estudada localizada no Planalto Meridional, que destaca a importância dos níveis de base para as taxas de denudação. Por exemplo, a região formada pela Depressão Central composta por rochas principalmente sedimentares, foi o local que indicou com maior frequência divisores móveis. Esse é o caso do setor B (Figura 21B) onde localmente todos os divisores apresentaram mobilidade em direção a bacia do Rio Ibicuí. Infere-se que esta região é a mais propensa a sofrer processos fluviais relacionados com migração de divisores, uma vez que está localizada sobre rochas mais erodíveis e onde ocorrem as elevações mais baixas da área de estudo.

Ao comparar os resultados obtidos com a análise das sub-bacias de 4ª e 5ª ordem fluvial, observou que as análises considerando as sub-bacias de 5ª ordem fluvial foram mais robustas estatisticamente, pois consideraram um maior número de cabeceiras de drenagem em comparação com as de 4ª ordem. Por exemplo, o divisor nº 4 da análise das sub-bacias de 5ª ordem (Figura 18) utilizou um conjunto de 15 cabeceiras, enquanto para as sub-bacias de 4ª ordem esse mesmo total de cabeceiras foi diluído para 3 divisores, segundo Forte e Whipple (2019) é eficiente segmentar divisões para considerar o potencial de comportamento diferente ao longo de uma divisão. Todavia, os resultados foram similares para as duas ordens fluviais analisadas, mostrando que a região central da área de estudo possui elevado nível de mobilidade, com avanço geral dos divisores em direção a bacia do rio Ibicuí.

As várias evidências de mobilidade encontradas ao longo do interflúvio principal dos rios Ibicuí e Jacuí a partir de dados de sensoriamento remoto e campo indica que esta área está sofrendo perturbações fluviais, com tendência predominante de migração em direção à bacia do Rio Ibicuí, provavelmente relacionadas com contrastes na erodibilidade litológica. A medida em que o processo fluvial avança em direção a montante as sub-bacias poderão conectar uma com as outras a partir de capturas fluviais (BISHOP, 1995), com transferência de fluxo e área de drenagem. Uma vez conectadas, a bacia hidrográfica do rio Jacuí aumentaria sua área de drenagem em pelo menos 1.380 km², se considerarmos somente a migração das

sub-bacias de 5ª ordem fluvial. Se conectadas, as sub-bacias da região onde hoje encontra-se o divisor Ibicuí-Jacuí sofreriam uma alteração na paisagem fluvial, com modificação do nível de base, mudança da direção do curso fluvial, e possivelmente, alteração da biodiversidade (e.g., peixes), assim como ocorrido em outras grandes bacias hidrográficas do país (e.g., ALBERT *et al.*, 2018; STOKES *et al.*, 2018).

6.5 Conclusões

Os resultados obtidos pelas barras de erros, bem como as imagens aéreas obtidas em campo mostraram diferenças como a densidade de drenagem, vegetação e erosão entre as cabeceiras das bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Jacuí, diferenças morfológicas significativas na topografia também foram observadas através do MDE. Os dados obtidos também mostraram que usar as métricas de Gilbert e χ em conjunto, calculadas a partir do MDE e feições hidrográficas, potencializa as informações extraídas da paisagem referente a mobilidade e estabilidade de divisores de drenagem e que confiar exclusivamente em uma das métricas é limitante.

Os resultados indicam que há um elevado nível de mobilidade dos divisores de drenagem, principalmente na região central da área de estudo, que reúne características geográficas predominantes como a ocorrência dominante da unidade geomorfológica da Depressão Central, o predomínio de substrato rochoso sedimentar, a ocorrência expressiva de argissolos vermelho, a ocorrência relativa de menores altitudes. Após as análises realizadas nos interflúvios das bacias hidrográficas dos rios Ibicuí e Jacuí, conclui-se que há um elevado nível de mobilidade dos divisores de drenagem, sendo que a bacia do rio Jacuí está avançando em direção a bacia do rio Ibicuí.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através de técnicas de sensoriamento remoto foi possível, através deste trabalho, realizar análises referentes ao comportamento de MDEs globais no estado do RS, constatando qual sua aderência as normas brasileiras estabelecidas no PEC-PCD, bem como seus desempenhos perante as diversidades do relevo das

unidades geomorfológicas do Estado. Essas análises mostraram que os modelos se aderiram mais as RRNN obtidas como referência nas unidades geomorfológicas mais planas, com baixa variabilidade altimétrica como Planície Costeira e Cuesta do Haedo. Também mostrou que apesar dos modelos SRTM v.3, NASADEM E AW3D30 serem convertidos para um datum vertical mais recente (i.e., EGM2008) e com melhor acurácia que o datum vertical de origem, o modelo COP-30 que possui já como datum vertical o EGM2008 obteve os melhores resultados de modo geral nas unidades Geomorfológicas.

Assim esta etapa do estudo, além de ter servido de suporte à tomada de decisão nesta dissertação, poderá servir para escolher qual modelo digital de elevação será o mais adequado para cada pesquisa, observando se as condições de cada unidade são semelhantes a área que está sendo estudada. Outra observação relevante é o quanto a influência da conversão de EGM de referência da base de dados melhora os resultados dos MDEs. Os resultados referentes aos MDEs obtidos no artigo do Capítulo 5, serviram para tomada de decisões de qual MDE escolher para trabalhar no artigo do Capítulo 6.

A síntese apresentada no artigo do Capítulo 6, onde é aplicado mecanismos de geomorfometria através das métricas de Gilbert e χ e tendo por fonte primordial de dados o MDE COP-30, apresentou diversas áreas instáveis com potencial de ocorrência de mecanismos de reorganização de drenagem, principalmente na região central da área de estudo onde localizasse a unidade geomorfológica Depressão Central que possui em sua composição rochas sedimentares que são susceptíveis a erosão. Também mostrou que o uso de dados orbitais e técnicas de sensoriamento remoto e geomorfometria é de grande eficiência para a identificação, análise e interpretação da mobilidade de divisores de drenagem.

A precisão do MDE utilizado (i.e., COP-30) foi fundamental para a localização dos interflúvios e cabeceiras de drenagem observadas na análise, com também de grande relevância para o cálculo das métricas abordadas, ressaltando a importância de utilizar um modelo acurado. Deste modo esta pesquisa servirá para orientar futuras pesquisas nestes locais que necessitam de uma investigação mais profunda a respeito dos mecanismos geradores desta instabilidade e quais seriam as consequências desta futura reorganização de drenagem abordada.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A.N. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do Rio Grande do Sul. **Boletim**, Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia, v. 11, p. 1-17, 1969.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13133: Execução de levantamentos topográficos**. Rio de Janeiro, p.02. 1994.
- _____. **NBR 14166: Rede de Referência Cadastral Municipal – Procedimento**, Rio de Janeiro, 1998.
- ADAM, K. N.; COLLISCHONN, W.; Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n.3, p. 69-79, 2013. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/49155>>. Acesso em: Mar. 2022.
- AGISOFT. **Global Geoid Models**. Disponível em: <<https://www.agisoft.com/downloads/geoids/>>. Acesso em: 25 jun. 2023.
- AIRBUS. **Copernicus Digital Elevation Model – Product Handbook**. Airbus Defence and Space. 2020. Disponível em: <https://spacedata.copernicus.eu/documents/20123/121239/GEO1988-CopernicusDEM-SPE-002_ProductHandbook_I4.0.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2023
- ALBERT, J.S.; VAL, P.; HOORN, C. The changing course of the Amazon River in the Neogene: center stage for Neotropical diversification. **Neotropical Ichthyology**. 16, 1-24. 2018.
- ALVES, F. C.; STOKES, M.; BOULTON, S. J.; ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M.; Post-rift geomorphological evolution of a passive continental margin (Paraíba region, northeastern Brazil): Insights from river profile and drainage divide analysis. **Geomorphology**, v. 414, p. 1-18, 2022.
- ARAÚJO, P. V. DO N.; AMARO, V. E.; ALCOFORADO, A.V. C.; SANTOS A. L. S. DOS. **Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, 351 – 364. 2019 DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_351_364.
- ARCANJO, J. B. A. **Fotogeologia: conceitos, métodos e aplicações**. Salvador – BA: CPRM/SGB, 2011.
- BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 19, ed. 4, 449-473. 1995. <https://doi.org/10.1177/030913339501900402>.
- BRASIL. Decreto-lei no 89.817 de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 1984.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GOMES, M. C. V.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Revisões de literatura da geomorfologia brasileira. In: MARENT, B. R.; REZENDE, É. A.; SORDI, M. V.; SALGADO, A. A. R. **Processos de reorganização da rede de drenagem no Brasil**. Brasília, 2023. P. 24-60. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/livros>. Acesso em: 26 jun. 2023.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2006. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul: Escala 1:750.000**. Disponível em: www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/.../mapa_rio_grande_sul.pdf. Acesso em: jun. 2023.

CREMON, É. H.; BETTIOL, G. M.; MAGNAJUNIOR, J. P. M.; MACEDO, F. C.; RABELO, M. W. O. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 3, p. 536–546, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n3-60846.

CRIPPEN, R., BUCKLEY, S., AGRAM, P., BELZ, E., GURROLA, E., HENSLEY, S., KOBRICK, M., LAVALLE, M., MARTIN, J., NEUMANN, M., NGUYEN, Q., ROSEN, P., SHIMADA, J., SIMARD, M., AND TUNG, W.: , NASADEM global elevation model: Methods and progress. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLI-B4, 125–128, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B4-125-2016. 2016.

CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992.

DAL'FORNO, G.L.; AGUIRRE, A.J.; HILLEBRAND, F. L.; GREGÓRIO, F. V. **Transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas no plano topográfico local pelos métodos da norma NBR 14166:1998 e o de rotações e translações**. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2010.

DSG. Diretoria de Serviço Geográfico. 2011. **Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais - ET-ADGV**. 2 ed. 295p. Disponível em: https://bdgex.eb.mil.br/portal/media/edgv/EDGV_DEFESA_F_Ter_2a_Edicao_2016_Aprovada_Publicada_BE_7_16.pdf. Acesso em: Nov. 2023.

EMATER/RS-Ascar. **Solos do Rio Grande do Sul**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008, 222 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA–SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p

EORC/JAXA – **Earth Observation Research Center/Japan Aerospace Exploration Agency**. 2007. About ALOS. Disponível em: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/ser/alos/sensor/prism_e.htm. Acessado em: 24 junho. 2023.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivations of altitude and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Butler & Tanner, 1972. P. 17–90.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, 45, RG2004, 2007. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

FORTE, A.M.; WHIPPLE, K.X. Short communication: the Topographic Analysis Kit (TAK) for TopoToolbox. **Earth Surface Dynamics**, v. 7, 87–95. 2019. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-87-2019>.

GASS, S. L. B.; LAURENT, F.; VERDUM, R. DA SILVA, D.M. Rio Ibicuí: “rio de areia” durante a estiagem 2019-2020, na confluência com o rio Uruguai, Brasil, **Confins [Online]**, 47 | 2020. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/confins/31893>>. Acesso em: Mar. 2022.

GERENTE, J. **Aplicação de variáveis geomorfométricas ao mapeamento de padrões de relevo na Bacia do Rio Itajaí-Açu/SC**. Tese (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018, p.105.

GOMES, M. G. D. S. **Perdas de solo, nutrientes e água por erosão e o subfator Cill em Argissolo e Latossolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista. São Paulo, p. 53, 2019.

GROHMANN, C.H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. **Remote Sensing of Environment**, 2018. 212:121-133. Doi:10.1016/j.rse.2018.04.043

GUTH, P. L.; GEOFFROY, T. M. (2021). LiDAR point cloud and ICESat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models: Copernicus wins. **Transactions in GIS**, 25, 2245– 2261. <https://doi.org/10.1111/tgis.12825>.

GUTH, P. L.; VAN NIEKERK, A.; GROHMANN, C. H.; MULLER, J.-P.; HAWKER, L.; FLORINSKY, I. V.; GESCH, D.; REUTER, H. I.; HERRERA-CRUZ, V.; RIAZANOFF, S.; et al. Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. **Remote Sensing**. 2021,13, 3581.<https://doi.org/10.3390/rs13183581>.

HAUSMANN, A. **Aspectos hidrogeológicos das áreas basálticas do Rio Grande do Sul**, Anais. Primeiras Jornadas Geológicas Argentinas. Buenos Aires, Argentina, p. 103-136. 1962.

HARTMANN, L. A. A história Natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o Recente. **Ciência E Natura**, 36(3), 173–182. 2014. <https://doi.org/10.5902/2179460X13236>

HOLZ, M. **Do mar ao deserto: a evolução do Rio Grande do Sul no tempo geológico**. Porto Alegre, RS: Ed. da UFRGS, 1999. 142 p.

JAIN, A. O.; THAKER, T.; CHAURASIA, P. P.; SINGH, A. K. Vertical accuracy evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-V3.1 of 30-m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi basin India. **Geocarto**

International, v. 33, n. 11, p. 1237-1256, 2017. DOI: 10.1080/10106049.2017.1343392.

LISBÔA, N. A.; CASTRO, J. H. W. Captura do sistema fluvial Camaquã pelo sistema fluvial Jacuí-São Gabriel, RS. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, [s.n.], 1998, Santos, Brasil. **Anais do IX SBSR**. Santos: INPE, p. 415-424, 1998.

MACHADO, M. **Avaliação da acurácia vertical dos modelos digitais de elevação SRTM, ALOS World 3D, NASADEM para as províncias geomorfológicas no estado do Rio Grande do Sul**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 76. 2023.

MEDEIROS, L. C., FERREIRA, N. C., FERREIRA, L. G. Avaliação de Modelos Digitais de Elevação Para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Cartografia** No 61/02, (ISSN 0560-4612). 2009.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012.

MORAIS, J.; FARIA, T.; ELMIRO, M.; NERO, M.; SILVA, A.; NOBREGA, R. Altimetry assessment of Aster Gdem V2 and SRTM V3 Digital Elevation Models: a case study in urban área of Belo Horizonte, MG, Brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 4, p. 654-668, 2017. DOI: 10.1590/S1982-21702017000400043.

PERRON, J.T.; ROYDEN, L. An integral approach to bedrock river profile analysis. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, 570–576.2012.

PIKE, R.J. **Geomorphometry: diversity in quantitative surface analysis**. **Progress in Physical Geography**, v.24, n.1, p.1–20, 2000.

PILAU, E. M. **Perspectivas geográficas pertinentes para uma análise integrada da Cuesta do Haedo Brasil Uruguai**. Trabalho de Conclusão do Curso de Geografia, 2011, IGEO/UFRGS, Porto Alegre. Disponível: <http://hdl.handle.net/10183/55820>.

PRÉMAILLON, M.; REGARD, V.; DEWEZ, T. J. B.; AUDA, Y. 2018. GlobR2C2 (Global Recession Rates of Coastal Cliffs): a global relational database to investigate coastal rocky cliff erosion rate variations, **Earth Surface Dynamics**, 6, 651–668, <https://doi.org/10.5194/esurf-6-651-2018>.

PURINTON. B.; BOOKHAGEN, B. Beyond Vertical Point Accuracy: Assessing Inter-pixel Consistency in 30 m Global DEMs for the Arid Central Andes. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, p.1-24, 2021. DOI: 10.3389/feart.2021.758606.

RIO GRANDE DO SUL, Estado. Fepam, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler. **Qualidade Ambiental**. Porto Alegre, 2012. Disponível em: < http://ww3.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_jacui/jacui.asp>. Acesso em: jun. 2022.

_____. SEMA, Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **U050 - Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí**. Porto Alegre, 2020. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/u050-bh-ibicui>>. Acesso em: Mar. 2022.

ROBAINA, L.E.S.; TRENTIN, R.; BAZZAN, T.; RECKZIEGEL, E.W.; VERDUM, R.; DE NARDIN, D. Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.11, n.2, p.11-23, 2010.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologias**. Porto Alegre, RS. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. UFRGS, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/32620>. Acesso em: Mar. 2022.

SALGADO, A. A. R.; CHEREM, L. F. S.; SORD, M. V. Grandes capturas fluviais no Brasil: síntese das novas descobertas. **Estudos do Quaternário**, n. 19, p. 23-31, 2018. DOI: 10.30893/eq.v0i19.176.

SALVADOR, Prefeitura Municipal de. Secretaria Municipal da Fazenda. **Produtos Cartográficos**. Salvador, 2018. Disponível em: <<http://cartografia.salvador.ba.gov.br/index.php/menu-cartografia/cartografia-de-referencia>>. Acesso em: jun. 2023.

SCHWANGHART, W., SCHERLER, D. Short communication: TopoToolbox 2 – MATLABbased software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surface Dynamics**, 2, 1–7. <https://doi.org/10.5194/esurf-2-1-2014>. 2014.

SILVA, I.; SEGANTINE, P.C.L. **Topografia para engenharia: teoria e prática de geomática**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 412p.

SIMIONI, J. P. D.; ROVANI, F. F. M.; LENSSE, A. C.; WOLLMANN, C. A.; Caracterização da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, RS. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 28, p. 112-133, 2014. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/90008/92798>>. Acesso em: Mar. 2022.

SORDI, M. V.; SALGADO, A. A. R.; SIAME, L.; BOURLÉS, D.; PAISANI, J. C.; LEANNI, L.; BRAUCHER, R.; COUTO, E. V. Implications of drainage rearrangement for passive margin escarpment evolution in southern Brazil. **Geomorphology**, v. 306. 155-169, 2018. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.01.007

SOUZA, M. D.; RAMOS, A. P. M.; JUNIOR, J. M. **Análise da Acurácia Altimétrica do Modelo Digital de Superfície ALOS AW3D30 para o Mato Grosso do Sul**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro. ISSN: 0101-9759 e ISSN: 1982-3908 Vol. 42 – 3/2019 p. 333-338. Disponível em: <<http://www.anuario.igeo.ufrj.br>>. Acesso em: jun. 2023.

STOKES, M.F., GOLDBERG, S.L., PERRON, T., 2018. Ongoing river capture in the Amazon. **Geophysical Research Letters**. 45, 5545-5552.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DOLMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande Do Sul**. 3. Ed., ver. E ampl. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2018. 252p.

SUERTEGARAY, D.M.A.; GUASSELLI, L. Paisagens (imagens e representações) do Rio Grande do Sul. In: VERDUM, R.; BASSO, L.A.; SUERTEGARAY, D.M.A.(Orgs) **Rio Grande do Sul: paisagens e territórios**. 1 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004. p. 27-38.

TADONO, T; NAGAI, H.; ISHIDA, H.; ODA, F.; NAITO, S.; MINAKAWA, K.; IWAMOTO, H. 2016. Initial Validation of the 30 m-mesh Global Digital Surface Model Generated by ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4: 157-162.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.; Formas de relevo da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: Obtidas por classificação topográfica automatizada, *Confins* [online], 45 | 2020. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.29381>. Disponível em: <<http://journals.openedition.org/confins/29381>>; Acesso em: jun. 2023.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 943 p.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008. 72p. (INPE-15318- RPQ/818).

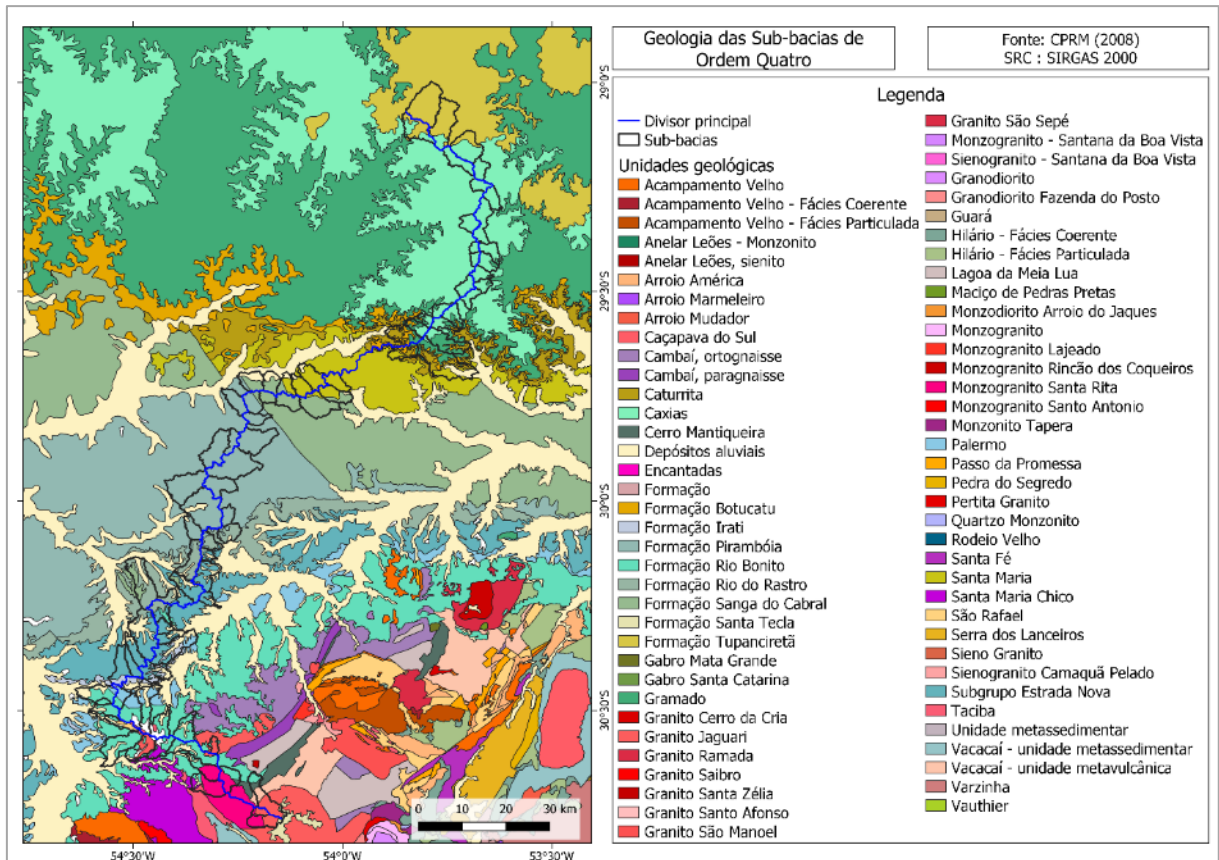
VIEL, J. A.; DA ROSA, K. K.; MENDES JUNIOR, C. W. Avaliação da Acurácia Vertical dos Modelos Digitais de Elevação SRTM, ALOS WORD 3D e ASTER GDEM: Um Estudo do Caso no Vale dos Vinhedos, RS – Brasil. ISSN: 1984-2295. **Revista Brasileira de Geografia Física** V.13, n.05. 2255-2268. 2020. <http://www.periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>.

WHIPPLE, K.X.; FORTE, A.M.; DIBIASE, R.A.; GASPARINI, N.M.; OUIMET, W.B. 2017. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: implications for the role of divide mobility in landscape evolution. *J. Geophys. Res. Earth Surface*. 122, 248–273. <https://doi.org/10.1002/2016JF003973>.

WILLETT, S.D.; MCCOY, S.W.; PERRON, J. T.; GOREN, L.; CHEN, C.Y.; 2014. Dynamic reorganization of River Basins. *Science* 343, 1–19. <https://doi.org/10.1126/science.1248765>.

WILSON, J. P. Digital terrain modeling. **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 107-121, 2012.

APÊNDICE A – Geologia da região referente as sub-bacias de 4ª ordem.



APÊNDICE B – Geologia da região referente as sub-bacias de 5ª ordem.

