INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

FÁBIO MACIEL PINTO

ANÁLISE DA SENSITIVIDADE DO RIO ITAPOCU/SC:
RELAÇÃO ENTRE AJUSTES GEOMÓRFICOS E EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO

Florianópolis, SC

2023

FÁBIO MACIEL PINTO

ANÁLISE DA SENSITIVIDADE DO RIO ITAPOCU/SC: RELAÇÃO ENTRE AJUSTES GEOMÓRFICOS E EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Clima e Ambiente do Campus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Mestre em Clima e Ambiente.

Orientadora: Débora Monteiro Brentano

Coorientadora: Fernanda Simoni Schuch

Florianópolis, SC

2023

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE

Aluno (a): *FABIO MACIEL PINTO*

Título:	ANÁLISE DA SENSITIVIDADE DO RIO ITAPOCUROY: RELAÇÃO ENTRE AJUSTES GEOMÓRFICOS E EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO

Aprovado com Louvor pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente

Dra. ***DEBORA MONTEIRO BRENTANO***

Orientadora / IFSC / Florianópolis – SC

Participação Presencial

(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. ***EDUARDO CARGNIN FERREIRA***

Membro Interno / IFSC / Garopaba - SC Participação Remota

(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. ***MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO***

Membro Interno / IFSC / Florianópolis - SC

Participação Presencial

(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dra. ***AMANDA CRISTINA PIRES***

Membro Externo / UDESC / Florianópolis - SC

Participação Presencial

(x) Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(x) *unanimidade*

Florianópolis, 17 de maio de 2023.

CDD 551.5
P659a

Pinto, Fábio Maciel
Análise da sensitividade do Rio Itapocu/SC: relação entre ajustes geomórficos e extremos de precipitação - [DIS] / Fábio Maciel Pinto; orientação de Débora Monteiro Brentano; coorientação de Fernanda Simoni Schuch – Florianópolis, 2023.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Morfologia fluvial. 2. Sensitividade de paisagem. 3. Cartografia temática. 4. Sensitividade fluvial. 5. Chuvas extremas. I. Brentano, Débora Monteiro. II. Schuch, Fernanda Simoni. III. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues - CRB 14/1117

Dedico ao meu pai
Bento que nada disso viu
e ao meu filho Antônio
que além disso verá.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às Profªs Dras. Débora Monteiro Brentano e Fernanda Simoni Schuch pelas orientações, apoio e incentivos na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Mário Francisco Leal de Quadro e ao Dr. Mário Luiz Martins Pereira pelas opiniões e colaborações. Aos docentes do Programa de Mestrado Profissional em Clima e Ambiente (PCAM) que, embora não tenham participado diretamente no desenvolvimento deste trabalho, auxiliaram-no indiretamente a partir dos conceitos e conteúdos transmitidos em suas disciplinas. Ao quadro de colaboradores do PCAM pelas prestezas e gentilezas.

Aos colegas discentes que proporcionaram novas amizades. À minha esposa Carla Jane Weber, pelo amparo no cumprimento deste velho objetivo.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) por sustentar este programa de pós-graduação voltado à prática, cujo âmago proporciona cruzamentos produtivos entre fundamentos, conceitos e conhecimentos de diversas Ciências em torno das temáticas Clima e Ambiente.

Finalmente, aos que desempenharam papel essencial no desenvolvimento deste trabalho, mas não estão citados nestas linhas resumidas, meu gentil reconhecimento.

There is a pleasure in the pathless woods,
There is a rapture on the lonely shore,
There is society where none intrudes,
By the deep Sea, and music in its roar:
I love not Man the less, but Nature more […]
(Lord Byron, 1818)

I met a traveller from an antique land
Who said: "Two vast and trunkless legs of stone
Stand in the desert. Near them on the sand,
Half sunk, a shattered visage lies, whose frown
And wrinkled lip and sneer of cold command
Tell that its sculptor well those passions read
Which yet survive, stamped on these lifeless things,
The hand that mocked them and the heart that fed.
And on the pedestal these words appear:
`My name is Ozymandias, King of Kings:
Look on my works, ye mighty, and despair!'
Nothing beside remains. Round the decay
Of that colossal wreck, boundless and bare,
The lone and level sands stretch far away".
(Percy Bysshe Shelley, 1818)

RESUMO

Processos morfodinâmicos em sistemas fluviais estão relacionados a fatores naturais que provocam alterações na paisagem. Eventos meteorológicos extremos de precipitação, correspondem a um dos agentes de modelagem da paisagem responsáveis por essas alterações. Nesse sentido, a caracterização dos ajustes morfológicos de ocorrência usual em um rio e a identificação das geoformas do vale são subsídios para avaliar a capacidade de modificação do sistema hidrográfico. Neste trabalho foram identificadas formas de ajustes, geoformas do vale fluvial e analisada a influência de eventos extremos de precipitação na evolução morfológica do rio Itapocu, em um trecho entre os Municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim e Araquari, Estado de Santa Catarina. Inicialmente, foi realizada a morfometria de dados geoespaciais extraídos de aerofotografias dos anos de 1957, 1978, 2010 e de imagem orbital CBERS 4A do ano de 2021, proporcionando a classificação dos ajustes morfológicos em Expansão de Barra Fluvial Ativa, Retraimento de Barra Fluvial Ativa, Incorporação de Barra à Planície de Inundação, Estreitamento de Canal Fluvial, Expansão de Canal Fluvial, Migração de Canal Fluvial, Rotação de Curva, Translação de Curva e Migração da Inflexão da Curva. Após, foram analisados eventos extremos de precipitação ocorridos no vale fluvial com o apoio de imagens orbitais Sentinel-2, as quais foram utilizadas para a extração de dados geoespaciais que denotam a influência desses eventos na paisagem fluvial. Concomitantemente, foram utilizados dados de precipitação de séries históricas de pluviômetros automáticos do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Os eventos, classificados em Chuva Intensa e Chuva Persistente, ocorreram entre os dias 30/01/2019 e 15/04/2019; 15/11/2020 e 30/12/2020; e 23/02/2021 e 10/03/2021. Considerando os três períodos de análise, 89,2% do rio foi sensível aos eventos extremos. Nesse sentido, quanto maior a intensidade e a persistência do evento extremo de precipitação, maior é a possibilidade de produção de ajustes geomórficos significativos, ou seja, maior é a sensitividade do ambiente fluvial, com menor incidência de zonas da paisagem insensíveis ou estáveis ante os eventos extremos.

Palavras-Chave: Morfologia Fluvial, Sensitividade de Paisagem, Cartografia Temática, Sensitividade Fluvial, Chuvas Extremas.

ABSTRACT

Fluvial morphodynamics processes are related to natural factors that changes the landscape. Extreme precipitation events corresponds to one of the principal landscape modeling agents. Hereupon, the characterization of the morphological adjustments usually occurred in a river and the identification of the geoforms are desirable to evaluate the capacity of landscape modifications on an hydrographic system. Therefore, this research identifies forms of adjustments, valley geoforms and analyzes its interactions with extreme rainfall events on the morphological evolution of the Itapocu River, between the municipalities of Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim and Araquari, State of Santa Catarina. Initially, there was a temporal analysis of geospatial data extracted from aerial photographs from the years 1957, 1978, 2010 and a CBERS 4A orbital image from 2021. That provided the classification of the morphological adjustments related to the river as Fluvial Bar Expansion, Fluvial Bar Retraction, Fluvial Bar Incorporation to the Flood Plain, River Channel Narrowing, River Channel Expansion, River Channel Migration, Curve Rotation, Curve Translation and Migration of the Curve Inflection. Afterwards, extreme precipitation events that affected the study area were analyzed with support of Sentinel-2 orbital images, which were also used to extract geospatial data that denotes the influence of these events on the landscape. Furthermore, historical precipitation data from automatic pluviometers from the Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) were used. The extreme rainfall events were classified as Hard Rainfall and Persistent Rainfall. The events took place between 01/30/2016 and 04/15/2019; 11/15/2020 and 12/30/2020; and 02/23/2021 and 03/10/2021. Considering the three analysis periods, 89.2% of the river was Sensitive to extreme rainfall events. In this way, the greater the intensity and persistence of the extreme precipitation event, the greater the possibility of producing significant geomorphic adjustments; that is, the greater the sensitivity of the fluvial environment, with less incidence of insensitive or stable landscape zones to the extreme events.

Keywords: Fluvial Morphology, Landscape Sensitivity, Thematic Cartography, Fluvial Sensitivity, Extreme Precipitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espelho da página de submissões da Revista Brasileira de Geomorfologia.....27

Figura 2 – Espelho do e-mail de confirmação da submissão à Revista Brasileira de Geomorfologia.....27

Figura 3 – Croqui de localização da área de estudo sobre composição RGB das bandas 3, 2 e 1 do satélite CBERS 04A, cena CBERS_4A_WPM_20210625_205_146_L4.....32

Figura 4 – Mapa geológico simplificado da bacia do rio Itapocu (A) com detalhe da área de estudo (B).....32

Figura 5 – Fluxograma de preparação prévia para a vetorização.....34

Figura 6 – Fluxograma explicativo dos procedimentos de identificação dos ajustes. 37

Figura 7 – Afloramentos de magmatitos nas imediações da confluência dos rios Humboldt e Novo, Corupá (A); e de metamorfitos nas proximidades da Ponte Alberto Bauer, Jaraguá do Sul (B).....39

Figura 8 – Unidades geomórficas e vale fluvial para o ano de 1957.....40

Figura 9 – Unidades geomórficas e vale fluvial para o ano de 1978.....41

Figura 10 – Unidades geomórficas e vale fluvial para o ano de 2010.....42

Figura 11 – Unidades geomórficas e vale fluvial para o ano de 2021.....43

Figura 12 – Subunidade Planícies de Inundação Indiferenciadas, dotada de paleocanal com margem e barra preservadas, sito à Rua Antônio Machado.....44

Figura 13 – Contato aproximado das unidades Planícies de Inundação, subunidade Barras Fluviais, e Terraços Fluviais (A), com detalhe da margem arenosa do rio, instalada em barra incorporada à planície nas proximidades da Ponte Ricardo Grützmacher, Jaraguá do Sul (B).....45

Figura 14 – Intercalações de cascalho e areia cascalhosa, margem fluvial próxima à Rua Augusto Schwarz (A); e de areias finas a médias em barra, topônimo Ilha Schubert, Jaraguá do Sul (B).....46

Figura 15 – Gráficos das variações interanuais no comprimento das seções longitudinais (A); e na área total das barras ativas (B).....47

Figura 16 – Formas de ajuste identificadas na área de estudo, associadas ao canal e às barras fluviais.....49

Figura 17 – Formas de ajuste identificadas na área de estudo, associadas às barras e às curvas do canal fluvial.....50

Figura 18 – Gráficos da representatividade dos ajustes de Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf), Estreitamento de Canal Fluvial (SCf), das Seções Transversais (ST) que não apresentaram ajustes e daquelas com mais de um tipo de ajuste geomórfico.....53

Figura 19 – Distribuição das Seções Transversais (ST) que transeccionam barras fluviais. Representatividade dos ajustes Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf) e Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf). Distribuição das seções que não

apresentaram ajustes em barras e daquelas com ajustes associados nas barras e no canal.....54

Figura 20 – Gráficos da representatividade dos ajustes Rotação de Curva Fluvial (RCv), Translação de Curva Fluvial (TCv), Deslocamento Lateral de Curva Fluvial (DCv), em relação ao total de Seções Transversais (ST) com ajuste Migração de Canal Fluvial (MCf). Representatividade do ajuste Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação (IBf), em relação às seções com ajuste Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf).....55

Figura 21 – Gráficos da representatividade das principais associações entre ajustes geomórficos, considerando o total de Seções Transversais (ST) com mais de um ajuste em cada relação temporal, conforme consta na Figura 16.....56

Figura 22 – Espelho da página de submissões da revista *Resources, Environment and Sustainability*.....63

Figura 23 – Espelho do e-mail de confirmação da submissão à revista *Resources, Environment and Sustainability*.....63

Figura 24 – Croqui de localização sobre composição RGB de cenas Sentinel-2 datadas de 23/02/2021.....68

Figura 25 – Localização das estações 420650403A, 420450903A, 420890601A, 420890603A, 420890606A, 420890607A, 420130701A e 421060501A em relação à área de estudo.....71

Figura 26 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) das séries históricas em relação ao limiar de precipitação (mm) que representa o percentil 99. As linhas horizontais em azul indicam os máximos da precipitação diária. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99. As barras horizontais em preto, na porção inferior dos gráficos, indicam as relações temporais analisadas.....77

Figura 27 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) das séries históricas em relação ao limiar de precipitação (mm) que representa o percentil 99. As linhas horizontais em azul indicam os máximos da precipitação diária. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99. As barras horizontais em preto, na porção inferior dos gráficos, indicam as relações temporais analisadas.....78

Figura 28 – Estações pluviométricas e relação dos percentis 99 obtidos para as séries históricas (01/01/2016 a 30/06/2022).....79

Figura 29 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 30/01/2019 e 15/04/2019. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.. 81

Figura 30 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 30/01/2019 e 15/04/2019. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.. 82

Figura 31 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 15/11/2020 a 30/12/2020. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada

em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.. 83

Figura 32 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 15/11/2020 a 30/12/2020. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.. 84

Figura 33 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 23/02/2021 a 10/03/2021. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.. 85

Figura 34 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 23/02/2021 a 10/03/2021. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.. 86

Figura 35 – Gráficos da representatividade dos ajustes de Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf), Estreitamento de Canal Fluvial (SCf), das Seções Transversais (ST) que não apresentaram ajustes e daquelas com mais de um tipo de ajuste geomórfico.....88

Figura 36 – Distribuição das Seções Transversais (ST) que transeccionam barras fluviais. Representatividade dos ajustes Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf) e Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf). Distribuição das seções que não apresentaram ajustes em barras e daquelas com ajustes associados nas barras e no canal.....89

Figura 37 – Gráficos da representatividade dos ajustes Rotação de Curva Fluvial (RCv), Translação de Curva Fluvial (TCv), Deslocamento Lateral de Curva Fluvial (DCv), em relação ao total de Seções Transversais (ST) com ajuste Migração de Canal Fluvial (MCf). Representatividade do ajuste Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação (IBf), em relação às seções com ajuste Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf).....90

Figura 38 – Gráficos da representatividade das principais associações entre ajustes geomórficos, considerando o total de Seções Transversais (ST) com mais de um ajuste em cada relação temporal, conforme consta na Figura 36.....91

Figura 39 – Delimitação das zonas morfológicas e do vale fluvial.....92

Figura 40 – Distribuição da precipitação (mm) na bacia hidrográfica do rio Itapocu nos dias de Chuva Intensa (CI) a partir de dados de precipitação MERGE.....93

Figura 41 – Distribuição da precipitação (mm) na bacia hidrográfica do rio Itapocu nos dias de Chuva Intensa (CI) a partir de dados de precipitação MERGE.....94

Figura 42 – Espacialização dos eventos extremos de precipitação em relação à área de estudo, a partir de krigagem ordinária. Totais de precipitação (isolinhas) representados em mm.....95

Figura 43 – Sensitividade do canal fluvial aos eventos extremos de 30/01/2019 a 15/04/2019 (A); 15/11/2020 a 30/12/2020 (B); 23/02/2021 a 10/03/2021 (C); Insensíveis ou Estáveis nos três períodos e Sensíveis aos eventos de ao menos um período (D).....99

Figura 44 – As setas amarelas indicam afloramentos de rochas (*knickpoints*) associados as barras fluviais situadas nas zonas Z15 (A) e Z24 (B) (C).....110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos materiais e métodos empregados pelos autores.....20

Tabela 2 – Detalhamento da imagem orbital e aerofotografias utilizadas na extração das feições.....34

Tabela 3 – Detalhamento das imagens orbitais selecionadas.....70

Tabela 4 – Identificação das estações pluviométricas utilizadas no estudo.....71

Tabela 5 – Limiares de detecção de eventos extremos das estações.....79

Tabela 6 – Registro de eventos de Chuva Intensa (CI) e Chuva Persistente (CP)....80

Tabela 7 – Valores-*p* resultantes do teste de normalidade de Shapiro-Wilk.....96

Tabela 8 – Sensitividade do canal fluvial de acordo com a subdivisão em zonas morfológicas.....97

Tabela 9 – Sensitividade do canal fluvial de acordo com a subdivisão em zonas morfológicas, considerando os três períodos de observação.....98

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÔNIMOS E SIGLAS

AMVALI – Associação dos Municípios do Vale do Itapocu

ASTER GDEM – *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model*

CBERS – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CGCM1 – *Canadian Global Coupled Model*

CI – Chuva Intensa

CLASSIC – *Climate and Land-use Scenario Simulation In Catchments*

CP – Chuva Persistente

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil

DYHAM – *Regional Dynamic Hydroclimatologic Assessment Model*

ECHAM4 – *European Centre Hamburg Model*

ECf – Expansão de Canal Fluvial

EBf – Expansão de Barra Fluvial Ativa

ESA – *European Space Agency*

GrADS – *Grid Analysis and Display System*

HadCM3 – *Hadley Centre Coupled Model*

IBf – Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

MCf – Migração de Canal Fluvial (MCf)

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital de Terreno

MSI – *Multispectral instrument*

mST – Meia seção transversal

NDWI – *Normalized difference water index* / Índice da diferença normalizada da água

NIR – Near infrared / Infravermelho próximo

PAST – *Paleontological Statistics*

PDM – *Probability Distributed Model*

RBf – Retraimento de Barra Fluvial Ativa

RCv – Rotação de Curva Fluvial

RMSE – Raiz do erro quadrático médio

SAC – Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul

SCf – Estreitamento de Canal Fluvial

SDS – Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina

SIXMaps – *Spatial Information Exchange*

SL – Seção longitudinal

SPOT – *Satellite Pour l'Observation de la Terre*

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

ST – Seção transversal

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

TCv – Translação de Curva Fluvial

UTM – Sistema universal transverso de Mercator

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....15
1.1 JUSTIFICATIVA.....17
1.2 OBJETIVOS.....18
1.1.2 Objetivo Geral.....18
1.1.2.1 Objetivos Específicos.....19
2 REVISÃO DE TRABALHOS SOBRE SENSITIVIDADE FLUVIAL.....19
3 CARACTERIZAÇÃO DOS AJUSTES NA MORFOLOGIA DO RIO ITAPOCU, REGIÃO DOS MUNICÍPIOS DE CORUPÁ E GUARAMIRIM (SC).....27
3.1 INTRODUÇÃO.....29
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....31
3.2.1 Área de Estudo.....31
3.2.2 Vetorização e Mapeamento das Geoformas do Vale Fluvial.....33
3.2.3 Morfometria das Geoformas e Identificação dos Ajustes Geomórficos.…35
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....38
3.3.1 Geoformas.....38
3.3.1.1 Vale Fluvial.....38
3.3.2 Ajustes Geomórficos.....46
3.3.2.1 Caracterização dos Ajustes na Geometria e Posição Espacial do Canal.....47
3.3.2.2 Caracterização dos Ajustes Associados às Barras Fluviais.....48
3.3.2.3 Caracterização dos Ajustes Associados às Curvas Fluviais.....50
3.3.3 Representatividade e Interações entre Formas de Ajustes.....51
3.3.3.1 Relação Temporal 1957-1978.....51
3.3.3.2 Relação Temporal 1978-2010.....52
3.3.3.3 Relação Temporal 2010-2021.....53
3.3.3.4 Distribuição dos Ajustes entre 1957 e 2021.....55
3.4 CONCLUSÕES.....58
3.5 REFERÊNCIAS.....59
4 RELAÇÕES ENTRE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E AJUSTES GEOMÓRFICOS NA PAISAGEM DO RIO ITAPOCU, REGIÃO NORDESTE DE SANTA CATARINA.....63
4.1 INTRODUÇÃO.....65
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....67

4.2.1 Área de Estudo.....68
4.2.2 Análise Preliminar e Seleção de Eventos Pluviométrico e de Imagens Orbitais.....69
4.2.3 Caracterização e Espacialização dos Eventos Pluviométricos.....70
4.2.4 Procedimentos Morfométricos de Identificação de Ajustes Geomórficos 72
4.2.5 Análise da Significância dos Ajustes Geomórficos.....74
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....76
4.3.1 Características dos Eventos Extremos de Precipitação.....76
4.3.2 Representatividade e Interações entre Ajustes Geomórficos.....87
4.3.2.1 Relação Temporal 30/01/2019–15/04/2019.....88
4.3.2.2 Relação Temporal 15/11/2020–30/12/2020.....89
4.3.2.3 Relação Temporal 23/02/2021–10/03/2021.....91
4.3.3 Distribuição Espacial dos Eventos Extremos e Relações com os Ajustes Geomórficos na Paisagem Fluvial.....92
4.3.4 Análise da Significância dos Ajustes Geomórficos e Classificação das Zonas Morfológicas Sensíveis.....96
4.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E DIREÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....102
4.5 CONCLUSÕES.....103
4.6 REFERÊNCIAS.....104
5 PRODUTO TÉCNICO OU TECNOLÓGICO: MAPA SÍNTESE DA ANÁLISE DA SENSITIVIDADE.....109
5.1 OUTROS PRODUTOS TÉCNICOS OU TECNOLÓGICOS.....111
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....112
7 REFERÊNCIAS GERAIS.....113
APÊNDICES.....118

1 INTRODUÇÃO GERAL

As paisagens estão sujeitas a perturbações provocadas por mudanças nas condições ambientais do sistema ou por instabilidades estruturais, sendo que essas perturbações fazem com que a paisagem passe de uma condição de equilíbrio para uma situação com novos parâmetros de estabilidade, respondendo às perturbações de forma espacial complexa e transiente, através da modificação das suas geoformas (BRUNSDEN; THORNES, 1979). Do mesmo modo, a paisagem fluvial está sujeita a ajustes provocados por perturbações estimuladas por modificações ambientais permanentes ou momentâneas no sistema, naturais ou não. As forçantes naturais de modificação, genericamente, correspondem a eventos ambientais extremos.

Sistemas fluviais respondem de diferentes formas a esses eventos e estes, em alguns casos, sequer proporcionam respostas morfológicas detectáveis na paisagem (SCHUMM, 1979), pois as respostas dependem de fatores de resiliência, próprios do meio fluvial, capazes de atenuar a ação dos estímulos externos ao sistema (FRYIRS, 2017). Depreende-se a existência de camadas sobrepostas de processos capazes de desencadear as mudanças geomórficas na paisagem e camadas de fatores de resistência, capazes de absorver o impacto dos processos.

Nesse contexto, ocorrida uma alteração permanente, ou momentânea nos padrões e controles ambientais no sistema geomórfico, a capacidade de resposta através de modificações reconhecíveis espacialmente e persistentes temporalmente, portanto relevantes e cartografáveis, é expressa pelo conceito de sensitividade (BRUNSDEN; THORNES, 1979). A sensitividade denota a paisagem como o produto de fenômenos que organizam e retrabalham as geoformas, obedecendo às características do substrato (FRYIRS, 2017) ou arcabouço litoestrutural que controla o terreno.

A análise da sensitividade implica na avaliação da paisagem a partir da investigação dos seus limiares de estabilidade geomórfica, ou seja, dos fatores de modificação e dos controles geomórficos do terreno, permitindo a elaboração de modelos geoambientais fidedignos para o desenvolvimento da política ambiental, o planejamento da ocupação territorial, a melhoria da qualidade funcional do ambiente, a gestão ambiental e de riscos naturais (SCHUMM, 1979; SILVA; SILVA, 2016; FRYIRS, 2017). Com isso, o estudo de sensitividade de sistemas fluviais é historicamente relacionado ao intuito de compreender as mudanças ambientais

nesses sistemas, com o objetivo de prever riscos (RODRIGUES, 2021).

Geoformas sedimentares associadas às paisagens fluviais são especialmente sensíveis a quaisquer perturbações nas condicionantes ambientais do sistema (SCHUMM, 1979, 1993; HOLBROOK; SCHUMM, 1998; CROSBY; WHIPPLE, 2006) e desse modo, seus limiares de estabilidade são sensíveis a perturbações periódicas, ou ocasionais nas condicionantes gerais do sistema.

Diversas são as causas responsáveis pelas alterações sofridas por uma paisagem. Condições de desequilíbrio com mudanças substanciais na paisagem fluvial, são influenciados por processos que podem provocar alterações nos níveis de base locais ou fluviais, como aqueles associados ao clima (SCHUMM, 1979, 1993; CROSBY; WHIPPLE, 2006).

Nesse contexto, a precipitação corresponde ao principal agente de modificação da paisagem, com impacto direto no regime de escoamento superficial (GILBERT, 1877; SCHEIDEGGER, 1973; DEAL; BRAUN; BOTTER, 2018). Entretanto, há uma disparidade na influência da precipitação na modificação da paisagem, pois processos morfogenéticos e morfodinâmicos são variavelmente influenciados pelo montante médio da precipitação, mas são os extremos que afetam intensamente e provocam alterações sensíveis na paisagem (GILBERT, 1877; SCHEIDEGGER, 1973; BASSO et al. 2015; DEAL; BRAUN; BOTTER, 2018). Portanto, os processos são acelerados ou retardados pelas variações nas taxas de precipitação, sendo que para os rios, as épocas caracterizadas por extremos são as mais significativas para a modelagem da paisagem (GILBERT, 1877).

Cardoso, Quadro e Bonetti (2020), apresentam uma breve revisão das definições e métodos de identificação de chuvas extremas utilizados por diferentes autores, revelando que não há uma padronização dessas definições, sendo que diferentes critérios são utilizados e, por vezes, uma mesma definição é empregada para classificar eventos associados a sistemas meteorológicos de escalas temporais e espaciais distintas. Entretanto, extrai-se de Deal, Braun e Botter (2018) que extremos de precipitação provocam impactos na paisagem dos canais fluviais. Desse modo, há uma associação entre intensidade das chuvas e aceleração da modelagem da paisagem. Nesse sentido, critérios gerais que identifiquem e classifiquem os extremos de precipitação e que possibilitem a associação destes com modificações na paisagem dos sistemas fluviais, são suficientes para a análise da sensitividade dos ambientes fluviais ante o regime de precipitação.

Denota-se que essa associação para a avaliação da sensitividade é desejável, inclusive, para o planejamento de uso e ocupação dos solos, tendo em vista o contexto atual de desenvolvimento de mudanças climáticas e de alterações nos parâmetros ambientais nos ecossistemas. Nesse sentido, a influência da pluviosidade e das mudanças climáticas nos ambientes fluviais, ocorre de maneira não linear, a depender do contexto climático anterior e posterior às mudanças (BASSO et al. 2015; DEAL; BRAUN; BOTTER, 2018). Porém, ainda que de maneira generalizada os rios sejam altamente sensíveis às alterações no clima, essa influência variará de acordo com cada sistema fluvial, sendo que estes absorvem e respondem de forma individual aos impactos das mudanças climáticas (PRUDHOMME et al. 2013a, 2013b).

1.1 JUSTIFICATIVA

Extremos de precipitação aumentam rapidamente a capacidade erosiva e deposicional do ambiente fluvial, ao ponto de proporcionar alterações morfológicas drásticas em poucas horas, ou dias (GILBERT, 1877; SCHEIDEGGER, 1973). Conforme Bower, Hannah e McGregor (2004), situações drásticas de alterações morfológicas em ambientes fluviais, produzidas por variações extremas na precipitação, demonstraram que os regimes hídricos dos rios tornam-se mais sensíveis, quanto maiores forem as variações intra-anuais e intra-sazonais nos padrões de chuvas, ou seja, quanto menor a monotonia do regime de precipitação.

No contexto das mudanças climáticas associadas a atividade humana, globalmente projeta-se a intensificação de processos ligados ao ciclo da água, incluindo sua maior variabilidade, com consequências para a precipitação global de monções, e a severidade dos eventos de chuva e seca regionais (IPCC, 2021). A precipitação e os fluxos de água de superfície se tornarão mais variáveis na maioria dos continentes até o final do século (IPCC, 2021). Na região Sul do Brasil estima-se um incremento de 10-20% nas taxas de precipitação em relação ao período dos anos de 1850-1900, sendo provável que o incremento do aquecimento global faça com que os eventos de precipitação intensa se acentuem e se tornem mais frequentes, com intensificação dos eventos diários de precipitação (IPCC, 2021).

Nesse cenário, extremos de precipitação, com capacidade de modificação rápida e permanente da paisagem fluvial, se tornarão mais frequentes, mais intensos e dotados de maior capacidade de produzir modificações na paisagem, como

demonstrado por Simonovic e Li (2004); Jha et al. (2006); Prudhomme et al. (2013a, 2013b) e a projeção de incremento de 10-20% nas taxas de precipitação para a região Sul do Brasil até o final do século (IPCC, 2021), tornando canais fluviais, vales e bacias hidrográficas mais sensíveis a ajustes geomórficos. Nesse cenário, o reconhecimento da sensitividade permite o planejamento de ações preventivas e mitigatórias contra os impactos das mudanças climáticas nos sistemas fluviais.

Dentre a variabilidade de condições que podem provocar modificações relevantes nos canais fluviais, a precipitação é considerada o principal agente de modificação da paisagem sob controle do clima (GILBERT, 1877; SCHEIDEGGER, 1973; DEAL; BRAUN; BOTTER, 2018). Situações em que o contexto é propício à concentração periódica de chuvas, favorecem a erosão e o transporte clástico, sendo mais significativos para a evolução paisagem (BASSO et al. 2015).

Portanto, justifica-se e considera-se que: a) a paisagem fluvial está sujeita a modificações rápidas, ocasionadas por extremos de precipitação; b) nessas situações, reconhecer a sensitividade, significa identificar e classificar as formas e sob quais condições ocorrem as modificações, ante fenômenos naturais extremos; c) o reconhecimento da sensitividade proporciona a identificação dos trechos da paisagem resistentes ou insensíveis aos fenômenos; d) os resultados das análises de sensitividade, podem ser traduzidos em produtos de cartografia temática, úteis para a gestão e o planejamento territorial.

Nesse contexto, a análise das interações entre extremos de precipitação e a evolução morfológica das paisagens fluviais é desejável para a identificação de áreas sensíveis aos eventos extremos e pode ser convenientemente convertida em ferramenta para atenuação dos impactos projetados das mudanças climáticas, além de possibilitar a identificação de possíveis locais ocupados por atividades antrópicas sob risco geomórfico.

1.2 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivo Geral

Cartografar as alterações morfológicas ocorridas em um trecho do rio Itapocu, com a finalidade de determinar a sensitividade da paisagem fluvial ao desenvolvimento de ajustes geomórficos associados a eventos meteorológicos extremos de precipitação.

1.1.2.1 Objetivos Específicos

a) Caracterizar os ajustes espaciais na morfologia do canal do rio Itapocu, no trecho de estudo;

b) Analisar a relação entre extremos de precipitação e alterações na morfologia do rio;

c) Elaborar carta de sensitividade ao desenvolvimento de processos de ajuste geomórfico.

2 REVISÃO DE TRABALHOS SOBRE SENSITIVIDADE FLUVIAL

Análises de sensitividade proporcionam o reconhecimento das causas das modificações da paisagem e as diferentes respostas do sistema fluvial frente a mudanças ambientais, fatores fundamentais para a compreensão da evolução geomórfica dos canais fluviais e de suas bacias hidrográficas (SANTOS; MARÇAL, 2021). Portanto, a sensitividade fluvial reflete a capacidade de adaptação geomórfica da paisagem de um rio após um evento de estresse ambiental.

Pretendendo revisar diferentes abordagens sobre a temática, a seguir é apresentado um breve compilado de avaliações da sensitividade fluvial, coletados em trabalhos selecionados publicados em território nacional e no exterior (Tabela 1). A Tabela 1 resume a variedade de materiais e métodos aplicáveis em análises da sensitividade fluvial. Denota-se que os principais os dados utilizados (materiais), abrangem informações sobre o regime de precipitação, o fluxo hídrico e dados sobre o terreno.

Os dados de precipitação e fluxo hídrico auxiliam na caracterização do fenômeno que ocasionou as modificações nas geoformas da paisagem. Por outro lado, as informações do terreno servem ao mapeamento ou caracterização das geoformas da paisagem sensíveis, bem como à identificação das modificações sofridas por essas geoformas.

Os dados de terreno podem ser coletados de bases cartográficas (mapas, cartas, plantas, etc.), de modelos de terreno ou de imagens captadas através de sensoriamento remoto. O nível de detalhe desses materiais determinará em que escala ou resolução será possível identificar modificações na paisagem.

Entre os trabalhos, observa-se uma variabilidade de ferramentas (métodos) utilizadas na análise da sensitividade. Entretanto, basicamente esses métodos abordam aspectos de técnicas associadas à modelagem climática, meteorológica,

hidroclimatológica e hidrológica baseada em cenários hipotéticos de mudanças climáticas, calibrados com dados diretos de precipitação, fluxo hídrico e topografia. Outros trabalhos centram os métodos em técnicas clássicas de fotointerpretação e de cartografia temática para a identificação e classificação dos ajustes sofridos pelas geoformas da paisagem fluvial.

Tabela 1 – Resumo dos materiais e métodos empregados pelos autores.

Materiais e Métodos	Bower, Hannah e McGregor (2004)	Simonovic e Li (2004)	Jha et al. (2006)	Barros, Souza e Corrêa (2009)	Fryirs, Brierley e Brierley (2009)	Notebaert e Verstraeten (2010)	Vital (2011)	Bertrand et al. (2013)	Prudhomme et al. (2013a , 2013b)	Villas-Boas e Marcal (2013)	Buraas et al. (2014)	Souza, Barros e Corrêa (2014)	Fryirs, Lisenby e Croke (2015)	Reid e Brierley (2015)	Silva (2015)	Souza e Corrêa (2015)	Kleina e Santos (2017)	Khan e Fryirs (2020)	Rodrigues e Souza (2020)	Rodrigues (2021)
Séries históricas (precipitação, fluxo hídrico e/ou temperatura)	X	X	X						X	X	X				X	X				X
Dados geoespaciais (cartográficos, topográficos e/ou topobatimétricos)			X		X		X	X		X			X	X	X			X	X	
Modelo digital (elevação, superfície e/ou terreno)				X			X					X		X	X	X		X		X
Imagens (aerofotografias, ortofotografias e/ou orbitais)					X		X	X		X	X		X	X		X	X	X		
Trabalhos anteriores						X														
Revisão sistemática de literatura						X														
Modelos (climáticos, meteorológicos, hidrológicos e/ou hidroclimatológicos)		X	X						X											
Fotointerpretação, cartografia temática e/ou morfometria				X	X		X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	

Para Fryirs (2017), a sensitividade fluvial é um tópico de estudos da Geomorfologia, ainda pouco explorado e com poucos avanços técnicos e teóricos desde o clássico trabalho de Brunsden e Thornes (1979). Provavelmente, a falta de interesse na temática por algumas décadas, se deveu a um período no qual houve acentuado reducionismo na escala dos estudos que abrangem aspectos da paisagem, no qual os objetivos de pesquisa reduziram-se a características pontuais do ambiente, a processos individualizados e à análise de modificações locais nos sistemas fluviais (PRESTON et al. 2011; FRYIRS, 2017).

Entretanto, em um cenário de crescentes preocupações concernentes às mudanças climáticas de fundo antrópico, com indicativos de impactos socioambientais negativos graves já em decurso, análises de sensitividade ganham

relevância. Impactos que têm afetado uma diversidade de ecossistemas e atividades econômicas; que terão longa duração e provavelmente serão agravados no decorrer das décadas. Nesse sentido, percebe-se o aumento progressivo do interesse pela temática a partir da década de 2010, principalmente no Brasil. No país, destacam-se as crescentes publicações de trabalhos na temática, abrangendo o estudo de casos situados em clima semiárido.

Ainda que a análise integrada de diversos aspectos ambientais, fatores de modificação da paisagem e aspectos antrópicos torne a implementação das investigações sobre a sensitividade fluvial extremamente complexa, o enfrentamento às consequências das mudanças climáticas, a crise hídrica, dentre outros problemas, demanda que a comunidade científica e técnica especializada debruce-se sobre a temática na busca de soluções metodológicas e expanda os estudos para outras regiões do Brasil.

No sentido de compreender a temática e analisar trabalhos anteriores, a seguir é apresentado um breve compilado de trabalhos. Estes, oriundos de diversas regiões e aplicados em diversos contextos climáticos, principalmente tendo em vista a ausência de extensa bibliografia sobre o tema.

Bower, Hannah e McGregor (2004) correlacionaram o regime de fluxo hídrico de rios do Reino Unido às variações na precipitação e temperatura do ar, através de dados de séries históricas de estações climatológicas. Os resultados demonstraram que rios analisados são sensíveis tanto às variações extremas intra-anuais a inter-anuais nos padrões das chuvas, enquanto não foi constatada relação entre temperatura do ar e fluxo hídrico (BOWER; HANNAH; MCGREGOR, 2004).

Simonovic e Li (2004) estudaram a sensitividade da bacia do rio Red, Canadá, e de sistemas de prevenção de inundações em relação a cenários de mudanças climáticas com foco nas variáveis precipitação e temperatura do ar. Para a construção dos cenários climáticos foram utilizados os modelos gerais de circulação atmosférica denomiados HadCM3 (*Hadley Centre Coupled Model*), CGCM1 (*Coupled Global Climate Model*) e ECHAM4 (*European Centre Hamburg Model*), além do modelo DYHAM (*Regional Dynamic Hydroclimatologic Assessment Model*) para a análise do impacto no sistema fluvial, calibrados com dados diretos de fluxo hídrico, de temperatura do ar e de precipitação diária (SIMONOVIC; LI, 2004). A análise concluiu que um aumento 1% na concentração de CO_2 na atmosfera é capaz de causar maior variabilidade no regime de precipitação, com consequente

aumento na descarga fluvial, na frequência e na severidade das inundações, tornando os ambientes fluviais e as estruturas de prevenção de enchentes menos resilientes a eventos de precipitação (SIMONOVIC; LI, 2004).

Em abordagem semelhante, Jha et al. (2006) analisaram a sensitividade da bacia superior do rio Mississípi, Estados Unidos da América, em cenários de mudanças climáticas com aumento na concentração de CO_2. Para isso, utilizaram um modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) alimentado com dados diretos de toporafia, de fluxo hídrico, de temperatura do ar e de precipitação diária, concluindo que existe uma relação entre a concentração de CO_2 e o regime de escoamento dos rios, sendo que cenários com incremento do gás na atmosfera demonstram grandes impactos no fluxo hídrico dos canais fluviais (JHA et al. 2006).

No Brasil, Barros, Souza e Corrêa (2009) avaliaram a sensitividade da paisagem da bacia do riacho Mulungu, ou do Salgado/PE, a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM e da cartografia geomorfológica, a qual possibilitou a identificação das características de uso e ocupação do solo, as geoformas da bacia, além dos controles físicos exercidos pelo substrato e que condicionam os vales fluviais. As conclusões indicam que barragens antrópicas construídas em rios da bacia atuam como forças de distúrbio da paisagem, limitando o influxo de sedimentos da montante para a jusante e desencadeando processos de respostas sensíveis como o desenvolvimento de erosão linear nos canais fluviais, com o consequente aumento na sensitividade da paisagem (BARROS; SOUZA; CORRÊA, 2009).

Fryirs, Spink e Brierley (2009) documentaram a distribuição espaço-temporal de ajustes geomórficos ocorridos entre 1881 e 1998 em rios da bacia do rio Hunter, Austrália, através de mapas históricos, ortofotografias e seções transversais de canal fluvial. Os procedimentos centraram-se na fotointerpretação, reconhecimento das geoformas dos vales fluviais e na morfometria destas, possibilitando a identificação de modificações espacialmente restritas e temporalmente não uniformes na paisagem fluvial, correspondentes a ajustes geomórficos de expansão, migração, incisão e retilinização de canal; abortamento de meandro (cutoff); expansão, extensão, rotação e translação de curva fluvial (FRYIRS; SPINK; BRIERLEY, 2009). Os ajustes se desenvolveram, especialmente, em trechos dos rios com substrato cascalho-arenoso, enquanto trechos sobre rochas consolidadas demonstraram alta resistência à mudança (FRYIRS; SPINK; BRIERLEY, 2009).

Ajustes envolvendo intensos processos erosivos e de retilinização de canais predominaram entre 1881 e 1931, já de 1931 a 1951 houve predomínio da expansão lateral dos canais e, a partir de então, os ambientes passaram a transicionar de erosivos para deposicionais, com predomínio de ajuste de estreitamento de canal (FRYIRS, SPINK; BRIERLEY, 2009).

Notebaert e Verstraeten (2010) estudaram a sensitividade de sistemas fluviais do leste e do centro da Europa durante o Holoceno, através de revisão sistemática e integração de dados de datação absoluta (radiocarbono) e datação relativa (palinomorfos) de trabalhos estratigráficos e geocrológicos. As conclusões indicam uma sincronicidade entre ajustes nos padrões de escoamento hídrico, sedimentação fluvial e mudanças climáticas no Holoceno (NOTEBAERT; VERSTRAETEN, 2010).

Vital (2011) analisou a sensitividade da paisagem da bacia hidrográfica do alto curso do rio Taperoá/PB, a partir de MDE SRTM, imagens LANDSAT e CBERS, além de bases cartográficas contínuas do mapeamento sistemático brasileiro. O autor elaborou produtos cartográficos temáticos abrangendo hipsometria, clinografia, uso e ocupação do solo, geoformas da bacia e mapa morfodinâmico. A partir dos produtos, concluiu-se que áreas com instabilidades morfodinâmicas na bacia, estão atreladas a zonas de falha com sinais de tectônica ressurgente, sendo que as áreas sensíveis correspondem às planícies flúvio-aluvionares, nas quais identificou-se processos de morfogênese como colmatação de vales, erosões em margens fluviais e desenvolvimento de feições erosivas lineares (VITAL, 2011).

Bertrand et al. (2013), estudaram a bacia do rio Drôme, França, com o objetivo de analisar a sensitividade do sistema ante o aumento da carga sedimentar transportada no sistema fluvial. Os principais materiais utilizados corresponderam a ortofotografias infravermelhas das quais obtiveram-se as geoformas do vales fluviais e a cobertura vegetal. Os dados obtidos foram comparados, através de procedimentos morfométricos, com bases cartográficas datadas de 1948, concluindo-se que a supressão da vegetação na bacia conduziu à introdução de sedimentos nos canais fluviais, ocasionando alterações geomórficas significativas (BERTRAND et al. 2013).

Prudhomme et al. (2013a, 2013b), através dos modelos hidrológicos PDM (*Probability Distributed Model*) e CLASSIC (*Climate and Land-use Scenario Simulation In Catchments Model*), calibrados com dados de fluxo hídrico e precipitação, estudaram a sensitividade de rios do Reino Unido. Desse modo,

constatou-se que de maneira generalizada, as consideram bacias hidrográficas são sensíveis a mudanças climáticas, mas respondem de forma particular aos impactos dessas mudanças, obedecendo às suas características físicas (PRUDHOMME et al. 2013a, 2013b). Inclusive, concluem que respostas geomórficas a eventos extremos, ocasionados por alterações nos padrões do clima, podem ocorrer em período curto (2 a 20 anos) (PRUDHOMME et al. 2013a, 2013b).

Já Villas-Boas e Marçal (2013), avaliaram a sensitividade da bacia do rio Macaé/RJ através da caracterização dos ajustes nas geoformas fluviais entre 2000 e 2010, através de imagens LANDSAT, ortofotografias, seções transversais do rio e série histórica de precipitação diária (1969-2009) da estação climatológica Galdinópolis. Os principais ajustes ocorreram nas barras fluviais e no leito do canal, concluindo-se que o rio Macaé é sensível a variações na precipitação, sendo que chuvas acima de 60 mm afetam a dinâmica dos processos de erosão e de deposição fluvial (VILLAS-BOAS; MARÇAL, 2013).

Burass et al. (2014), analisaram a influência de eventos extremos de enchentes ocasionados pela tempestade tropical Irene (Ago/2011) nas geoformas dos rios White e Saxtons, Estados Unidos da América, através de ortofotografias dos anos de 2009 a 2010, imagens WorldView de 2011 e dados de descarga hídrica durante a tempestade. Esses materiais possibilitaram a identificação de geoformas e a mensuração de distâncias entre margens fluviais antes e após a tempestade, além da potência unitária do fluxo hídrico (ω) durante o evento, concluindo-se que ao atingir o ω de 300W/m^2, foram desencadeados processos de expansão lateral dos canais, sendo a tempestade provocou ajustes em 74% do rio White e 99% do rio Saxton (BURASS et al. 2014).

Souza, Barros e Correa (2014) estudaram a sensitividade de um ambiente fluvial semiárido, correspondente à bacia do riacho do Saco/PE, como o apoio de Modelo Digital de Terreno (MDT) ASTER GDEM. Constatou-se que as planícies fluviais estão sujeitas a ajustes na paisagem devido ao influxo de sedimentos da montante nos períodos de inundações e às variações no regime de precipitação, ocasionando a colmatação ou a incisão de canais (SOUZA; BARROS; CORREA, 2014).

Através de ortofotografias e mapas históricos, Fryirs, Lisenby e Croke (2015) identificaram ajustes associados a eventos extremos de inundação no vale do riacho Lockyer, Austrália, no período entre 1886 e 2011. A partir desses materiais foram

extraídas as geoformas fluviais e identificados ajustes geomórficos erosionais, deposicionais e de reorganização do ambiente fluvial, concluindo-se que 26% do rio sofreu algum tipo de modificação no período, sendo resiliente a eventos extremos de inundações (FRYIRS; LISENBY; CROKE, 2015). Os ajustes predominantes corresponderam a alterações na largura do rio, geograficamente descontínuas e sem registro de modificações generalizados na paisagem (FRYIRS; LISENBY; CROKE, 2015).

Reid e Brierley (2015) analisaram ajustes ocorridos entre 1928 e 2007 no rio Tongarino, Nova Zelândia, através de bases cartográficas históricas, ortofotografias e MDT LiDAR. A partir destes materiais foram extraídas geoformas associadas ao vale fluvial e identificadas quatro tipologias de canal para o rio (divagante de fundo de calhau, entrelaçado de fundo cascalhoso, meandrante de fundo arenoso e delta multicanal), concluindo-se o tipo entrelaçado de fundo cascalhoso corresponde ao mais sensitivo, com ajustes morfológicos rápidos e recorrentes ao longo do período de estudo (REID; BRIERLEY, 2015).

Silva (2015), contribuiu para o tema ao estudar o riacho Umas, localizado na área urbana de Camaragibe/PE, com o intuito de observar a dinâmica entre pluviosidade e modificações no canal fluvial no ano de 2014 a partir de MDE SRTM, bases cartográficas vetoriais e dados de precipitação diária. Os materiais serviram para o mapeamento clinográfico, de direção de fluxo do escoamento superficial, das geoformas das encostas e vertentes, além da caracterização do regime de precipitação intra-anual (SILVA, 2015). As respostas do canal ante o regime de precipitação variou de acordo com as suas diferenças morfológicas, isto é, em trecho classificado como canal confinado, desenvolvido em leito rochoso, não ocorreram modificações, enquanto em trecho classificado como lateralmente não confinado houve ajuste em meandro (SILVA, 2015).

Souza e Corrêa (2015), cujos estudos foram centrados na paisagem da bacia do rio do Saco/PE, utilizaram um MDT ASTER GDEM para a produção de modelo de acumulação de fluxo hídrico, além de imagens QUICKBIRD e dados de precipitação para a avaliação da sensitividade da paisagem. Concluiu-se que as taxas de precipitação e a supressão da cobertura vegetal nativa controlam as modificações morfológicas na paisagem do rio, sendo que a substituição da vegetação por culturas agrícolas ocasiona o aumento da sensitividade através de incisão nos vales fluviais preenchidos (SOUZA; CORRÊA, 2015).

Por outro lado, Kleina e Santos (2017) mapearam a sensitividade da bacia do rio Sagrado em Morretes/PR entre 1954 e 2012, através da caracterização dos estilos de canais e ajustes fluviais, concentração de erosão, conectividade fluvial e processos de conversão do uso do solo. Como materiais, foram utilizadas aerofotografias, imagens SPOT e RapidEye, concluindo que alterações morfológicas relevantes no ambiente fluvial, ocorrem em trechos de rios enquadrados em planícies, apresentando alta sensitividade, enquanto em trechos confinados a parcialmente confinados por relevos com altas declividades demonstraram baixa sensitividade (KLEINA; SANTOS, 2017).

Khan e Fryirs (2020) estudaram a sensitividade dos rios da bacia do rio Richmond, Austrália, a partir de ajustes geomórficos erosionais e deposicionais ocorridos no ambiente fluvial desde a segunda metade do século XIX, com o apoio de ortofotografias, mapas históricos, imagens SPOT da base de dados espaciais SIXmaps e MDT LiDAR. Os rios foram subdivididos em trechos ou zonas de acordo com a ocorrência de ajustes, sendo classificados em Frágeis (sensitividade >75%), Sensíveis Ativos (20-75%), Sensíveis Passivos (20-50%), Insensíveis (5-20%) e Resistentes (sensitividade <5%) (KHAN; FRYIRS, 2020).

Já Rodrigues e Souza (2020), visaram o estabelecimento de níveis de sensitividade e de resiliência da paisagem fluvial para os riachos Cacimbinha, Santa Maria e Tigre no Município de São João do Tigre/PB. Desse modo, houve a cartografia em campo e a caracterização de estilos fluviais e de ajustes do canal, os quais demonstraram a extrema diversidade morfológica dos rios em uma bacia semiárida de abrangência local, além da variabilidade das sensitividades e as diferentes resiliências associadas a esses trechos, denotando a aplicabilidade das análises de sensitividade em escala local (RODRIGUES; SOUZA, 2020).

Rodrigues (2021) avaliou a sensitividade da bacia do alto curso do rio Piranhas/PB, através de MDE SRTM, além de séries históricas pluviométricas e fluviométricas, concluindo que os principais ajustes geomórficos incidentes nos rios estão associados ao abandono de meandros e à expansão lateral dos canais. Esses ajustes são desencadeados por pulsos de escoamento hídrico com alta vazão, relacionados ao comportamento das chuvas no semiárido, as quais proporcionam o aumento da sensitividade fluvial (RODRIGUES, 2021).

3 CARACTERIZAÇÃO DOS AJUSTES NA MORFOLOGIA DO RIO ITAPOCU, REGIÃO DOS MUNICÍPIOS DE CORUPÁ E GUARAMIRIM (SC)

Este capítulo corresponde ao manuscrito Caracterização dos ajustes na morfologia do rio Itapocu, região dos Municípios de Corupá e Guaramirim (SC), submetido no dia 04/07/2022 à Revista Brasileira de Geomorfologia (ISSN 2236-5664), publicação da União da Geomorfologia Brasileira (Figuras 1 e 2).

Figura 1 – Espelho da página de submissões da Revista Brasileira de Geomorfologia.

Figura 2 – Espelho do e-mail de confirmação da submissão à Revista Brasileira de Geomorfologia.

CARACTERIZAÇÃO DOS AJUSTES NA MORFOLOGIA DO RIO ITAPOCU, REGIÃO DOS MUNICÍPIOS DE CORUPÁ E GUARAMIRIM (SC)

CHARACTERIZATION OF THE MORPHOLOGICAL ADJUSTMENTS IN THE ITAPOCU RIVER, REGION OF THE CORUPÁ AND GUARAMIRIM MUNICIPALITIES (SC)

RESUMO

Rios são ambientes sensíveis, sujeitos a modificações que produzem ajustes nas formas da paisagem fluvial. Este trabalho objetiva a identificação desses ajustes, ocorridos em um trecho do rio Itapocu situado entre os Municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Araquari e Guaramirim, no Estado de Santa Catarina. A metodologia envolveu a extração de dados geoespaciais, equivalentes às geoformas do fundo do vale fluvial, inclusive canal e barras fluviais ativas, através da vetorização de aerofotografias dos anos de 1957 e 1978, ortofotografias de 2010 e imagem orbital CBERS 04A de 2021. Os ajustes foram identificados através de morfometria e fotointerpretação, com o delineamento e a correlação de seções longitudinais e transversais ao canal e às barras fluviais. Desse modo, foram identificadas as formas de ajuste Expansão de Barra Fluvial Ativa; Retraimento de Barra Fluvial Ativa; Estreitamento de Canal Fluvial; Expansão de Canal Fluvial; Migração de Canal Fluvial; Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação; Rotação de Curva Fluvial; Translação de Curva Fluvial; e Deslocamento Lateral da Curva Fluvial. Nesse sentido, constatou-se o predomínio dos ajustes de migração, estreitamento do canal e retração de barras fluviais ao longo do tempo.

Palavras-Chave: Morfologia Fluvial, Ajustes Geomórficos, Canal Fluvial, Paisagem Fluvial, Geomorfologia de Paisagem.

ABSTRACT

Rivers are sensitive environments, subject to adjustments that modifies the fluvial landscape. This research aims to identify the adjustments occurred in the Itapocu River, between the Municipalities of Corupá, Jaraguá do Sul, Araquari and Guaramirim, in the State of Santa Catarina, Brazil. The methodology involved the extraction of spacial corresponding to geomorphic features of the river valley,

including channel and river bars, through vectorization from aerial photographs of the years 1957 and 1978, orthophotographs from 2010 and CBERS 04A orbital image from 2021. The adjustments were identified through the outline of channel and river bars longitudinal and transversal cross sections, morphometry and photointerpretation. Thus, were identified the adjustments Active Bar Expansion, Active Bar Retraction, Active Bar Incorporation to the Flood Plain, River Channel Narrowing, River Channel Expansion, River Channel Migration, River Curve Rotation, River Curve Translation and Lateral Displacement of the River Curve. Furthermore, were identified the predominance of migration, channel narrowing and retraction of river bars, with a progressive reduction in bars total over time.

Keywords: River Morphology, Geomorphic Adjustments, River Channel, River Landscape, Landscape Geomorphology.

3.1 INTRODUÇÃO

As paisagens estão sujeitas a modificações ocasionadas por perturbações ambientais externas ao seu sistema geomórfico (BRUNSDEN; THORNES, 1979). Alterações morfológicas nas paisagens fluviais estão associadas a forçantes que interferem nos processos morfodinâmicos do ambiente fluvial e produzem ajustes nas geoformas deposicionais e erosionais associadas à dinâmica dos rios.

Entretanto, as paisagens fluviais respondem de diferentes formas a esses estímulos, pois alterações no ambiente fluvial, também envolvem fatores de resiliência, capazes de atenuar os impactos desses estímulos (SCHUMM, 1979; FRYIRS, 2017).

Nesse sentido, a identificação dos ajustes geomórficos, implica no reconhecimento tanto dos locais sensíveis aos distúrbios induzidos por forças exógenas ao sistema fluvial, como daqueles locais resistentes. Procedimentos de identificação dos ajustes, incidentes tanto nas formas transversais e em planta dos canais, como nas posições espaciais das margens e nas geoformas do fundo dos vales fluviais, frequentemente envolvem a extração de dados de produtos cartográficos e de sensoriamento remoto (FRYIRS; SPINK; BRIERLEY, 2009).

Materiais, métodos e modelos empregados nos procedimentos de identificação, variam entre estudos e fontes referenciais. Essas variações refletem a busca por modelos fidedignos, com a tentativa de aproximar os resultados das

análises com a realidade dos processos naturais e, principalmente, a necessidade de cumprir os objetivos dos estudos através dos materiais disponíveis, muitas vezes dotados de restrições e limitações.

Contudo, há um consenso implícito de que técnicas de geoprocessamento, morfometria e fotointerpretação, aplicadas em produtos cartográficos e de sensoriamento remoto, são adequadas para a identificação dos ajustes (FRYIRS; SPINK; BRIERLEY, 2009; BERTRAND *et al*. 2013; VILLAS-BOAS; MARÇAL, 2013; BURASS *et al*. 2014; FRYIRS; LISENBY; CROKE, 2015; REID; BRIERLEY, 2015; KLEINA; SANTOS, 2017; BRIERLEY *et al*. 2019; RODRIGUES; SOUZA, 2020; SANTOS; MARÇAL, 2021).

Esses procedimentos, além do reconhecimento dos ajustes que é fundamental para a compreensão da evolução geomórfica dos rios, propiciam a distinção dos trechos sensíveis dos canais e dos vales fluviais, sujeitos a ação de fatores que ocasionam modificações abruptas na paisagem (FRYIRS, 2017; SANTOS; MARÇAL, 2021). Inclusive, essa distinção é desejável para o gerenciamento estratégico dos recursos hídricos com vistas ao uso sustentável; a atenuação de problemas associados à demanda por água; o reconhecimento dos impactos socioambientais potenciais, decorrentes da ocupação de áreas sob risco geomórfico associado a fenômenos que possam provocar modificações severas na paisagem; e, desse modo, a identificação de áreas naturalmente sensíveis da paisagem fluvial e de proteção preferencial.

Porém, para relacionar causas com respostas, gerenciar recursos, avaliar impactos na tessitura dos meios social e ambiental, prognosticar perigos, avaliar probabilidades e condições de ocorrência das situações de risco, demanda-se a identificação e a compreensão dos ajustes incidentes em uma paisagem. Nesse sentido, Brierley e Fryirs (2005) apresentam modelo abrangente de classificação das formas de ajustes da morfologia fluvial, adaptado por Fryirs, Spink e Brierley (2009).

Portanto, pressupondo-se que os rios respondem de diferentes formas aos estímulos ambientais, pois são produtos das heterogeneidades do sistema geomórfico; que a identificação dos tipos de ajustes produzidos por um rio é etapa essencial para a investigação dos agentes externos que geram as condições para as modificações morfológicas; e que através desses estudos é possível determinar áreas sensíveis aos processos morfodinâmicos e relevantes para a preservação dos recursos hídricos a longo prazo, neste trabalho apresenta-se um estudo diagnóstico

que objetivou a identificação dos ajustes geomórficos ocorridos em um trecho do rio Itapocu, região Nordeste do Estado de Santa Catarina, entre os anos de 1957, 1978, 2010 e 2021.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais selecionados e os métodos desenvolvidos, se baseiam na extração de dados geoespaciais de produtos de sensoriamento remoto, a partir dos quais realizou-se mapeamento indireto das geoformas do vale e do canal fluvial, com o objetivo de identificar alterações morfológicas. Esses procedimentos foram desenvolvidos no Sistema de Informações Geográficas QGIS 3.20.

Para isso, utilizou-se aerofotografias dos anos de 1957, 1978 e 2010 disponibilizadas pela Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDE), além de imagem orbital do ano de 2021, oriunda do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O reconhecimento dos ajustes foi efetuado através de análise morfométrica e fotointerpretativa das modificações nas geoformas mapeadas.

3.2.1 Área de Estudo

A área está localizada na região Nordeste do Estado de Santa Catarina e abrange trecho do rio Itapocu entre os Municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim e Araquari. O trecho se inicia na confluência dos rios Novo e Humboldt, afluentes situados em Corupá, nas proximidades das encostas da Serra do Mar, e se estende até a desembocadura do rio Putanga, afluente situado na divisa entre Guaramirim e Araquari, nas imediações da planície costeira (Figura 3).

O arcabouço geológico da região abrange o Terreno Luís Alves, subdividido em Complexo Granulítico de Santa Catarina e Granitos Tardi a pós-colisionais – Tipo A; as Coberturas Vulcanossedimentares do Tipo Foreland, representada pelo Grupo Itajaí; e as Coberturas Sedimentares do Cenozoico (CPRM, 2014) (Figura 4).

O Complexo Granulítico de Santa Catarina compreende o embasamento de idades arqueanas a paleoproterozoicas, afetado no Neoproterozoico por processos vulcanossedimentares e intrusões graníticas alcalinas-peralcalinas (SIGA-JÚNIOR, 1995; BASEI et al. 2009). Aqueles correspondem à sedimentação terrígena e piroclástica, associada a vulcanismo básico a ácido em ambiente de convergência e colagem de placas, flexura litosférica, desenvolvimento de bacia *foreland* e de

cadeia orogênica (BASEI et al. 2009; COSTA, 2014). As intrusões correspondem a granitos geneticamente vinculados às coberturas vulcanossedimentares, sendo os representantes plutônicos dessas manifestações (KAUL, 1997; BASEI et al. 2009).

Figura 3 – Croqui de localização da área de estudo sobre composição RGB das bandas 3, 2 e 1 do satélite CBERS 04A, cena CBERS_4A_WPM_20210625_205_146_L4.

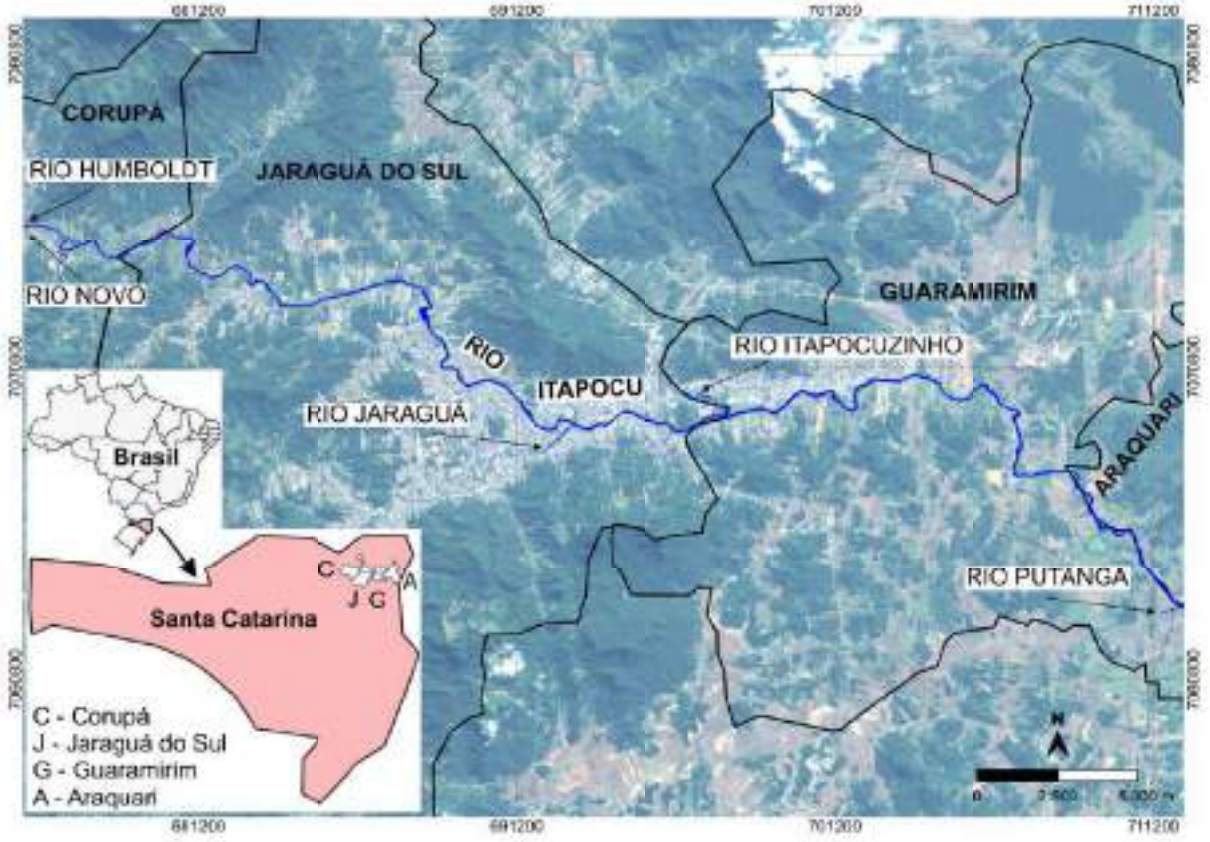
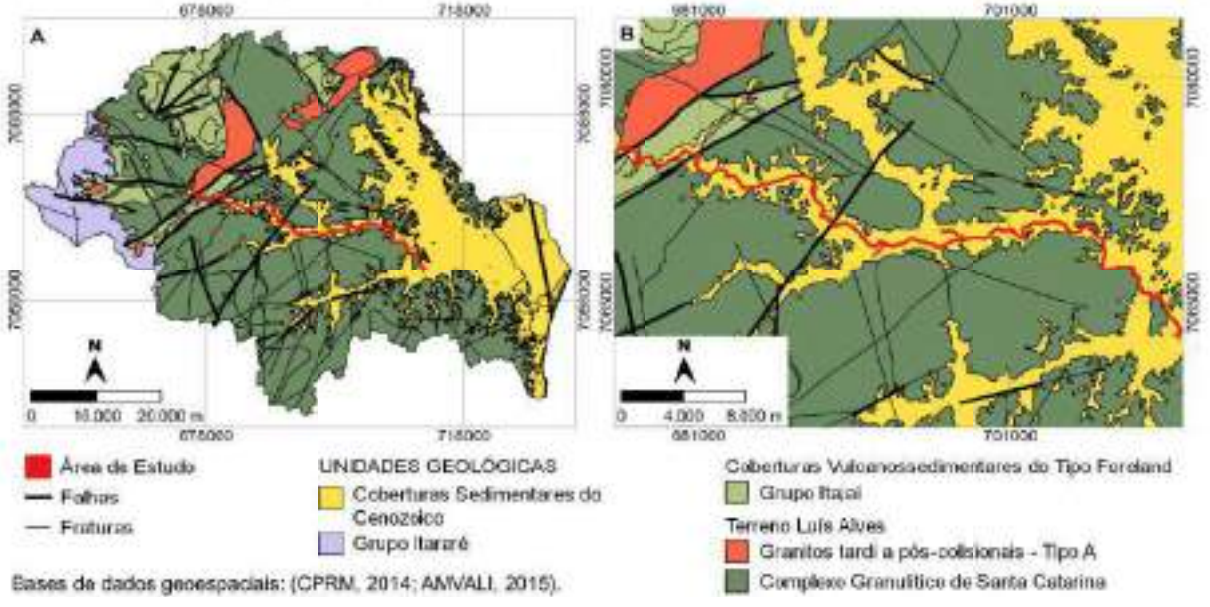


Figura 4 – Mapa geológico simplificado da bacia do rio Itapocu (A) com detalhe da área de estudo (B).



Finalmente, as Coberturas Sedimentares do Cenozoico correspondem aos sedimentos quaternários de origem aluvionar, colúvio-aluvionar, eólica e costeira que recobrem parcialmente as unidades mais antigas (CPRM, 2014).

3.2.2 Vetorização e Mapeamento das Geoformas do Vale Fluvial

A vetorização corresponde ao processo de transformação de uma imagem do formato matricial para o formato vetorial, produzindo objetos operacionais definidos por vetores representativos (VIEIRA, 1998). Trata-se da conversão através de geoprocessamento das feições do terreno identificáveis nas imagens digitalizadas, em objetos geométricos correspondentes a pontos, polígonos ou linhas manipuláveis em *software*. Essa conversão se dá através da fotoanálise das feições para a distinção de elementos texturais e fotointerpretação para atribuição de significado através de avaliação indutiva, dedutiva e comparativa das relações texturais da imagem (SOARES; FIORI, 1976).

Essa etapa visou o mapeamento indireto das geoformas do terreno, através da sua conversão para o formato vetorial (extensão *shapefile*). As geoformas corresponderam ao canal fluvial ativo; às barras fluviais ativas; às geoformas sedimentares de origem fluvial que atulham o fundo do vale (planícies e terraços fluviais); e às margens que limitam o vale e restringem a evolução lateral do canal. Estas, correspondentes ao contato entre os sedimentos fluviais, às encostas rochosas adjacentes ao vale ou os sedimentos colúvio-aluvionares associáveis aos processos morfodinâmicos das encostas (WHEATON et al. 2015).

A extração desses dados foi realizada manualmente para as aerofotografias dos anos de 1957, 1978, 2010 e para a imagem orbital CBERS 4A de 2021 (Tabela 2). Os pormenores metodológicos referentes ao tratamento prévio dessas imagens para o processo de vetorização constam a seguir.

Para a extração de dados geoespaciais da imagem CBERS 4A, as bandas espectrais B2 (G), B4 (NIR) e B0 (PAN) da cena de 2021 foram convertidas do *datum* WGS84 para SIRGAS2000. Para o realce de corpos hídricos, as bandas B2 e B4 foram aplicadas no índice da diferença normalizada da água (NDWI) de Mcfeeters (1996), obtendo-se um raster de resolução 8 m. A seguir foi realizado o *pan sharpening* desse raster, com aplicação da banda 0 e utilização de *script* (gdal_pansharpen.py) constante no *software* QGIS, obtendo-se um raster realçado com resolução 2 m. Após essa preparação, executou-se a vetorização (Figura 5).

Tabela 2 – Detalhamento da imagem orbital e aerofotografias utilizadas na extração das feições.

Ano	Cenas	Escala	Resolução Espacial	Origem
1957	2169, 3350, 3353, 3780, 3782, 3784, 3786, 3787, 9035, 9036, 9038	1:25.000		SDE[1] / SAC[2]
1978	111841, 11188, 11193, 14434, 14439,15928, 15930, 16047	1:25.000		SDE[1] / SAC[2]
2010	Orto-RGB_SG-22-Z-B-I-4, Orto-RGB_SG-22-Z-B-II-3, Orto-RGB_SG-22-Z-B-V-1		0,39 m	SDE[1] / Engemap[3]
2021	CBERS_4A_WPM_20210625_205_146_L4		2 e 8 m	INPE[4] / CBERS 4A[5]

[1]Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina. [2]Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul. [3]Engemap Engenharia, Mapeamento e Aerolevantamento. [4]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. [5]Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres.

Figura 5 – Fluxograma de preparação prévia para a vetorização.

As geoformas observadas nas aerofotografias do ano de 2010 (RGB), foram vetorizadas sem preparação inicial, tendo em vista que encontravam-se previamente georreferenciadas e ortorretificadas, em *datum* SIRGAS2000 e resolução espacial de 0,39 m. Desse modo, em condições adequadas para a extração de dados.

Já as aerofotografias de 1957 e 1978 foram georreferenciadas utilizando-se as cenas de 2010 e 2021 como referenciais para a determinação de pontos de controle, através da relação entre elementos texturais das imagens (vide ARCANJO, 2011, p.136). Em média, foram utilizados 140 pontos de controle por fotografia, os quais foram interpolados e reamostrados pelo método cúbico suavizado (*cubic spline*). Os RMSEs (raízes do erro quadrático médio) variaram entre 0,0001 a 9,96 m para 1957 e 0,001 a 8,17 m para 1978. Após a preparação, executou-se a vetorização das geoformas.

3.2.3 Morfometria das Geoformas e Identificação dos Ajustes Geomórficos

O procedimento de identificação dos ajustes baseou-se na morfometria das geoforma vetorizadas na etapa anterior. Para a classificação e nomenclatura dos ajustes, tomou-se como base os trabalhos de Brierley e Fryirs (2005); Fryirs, Spink e Brierley (2009).

Entretanto, esses procedimentos são negativamente afetados pelas escalas, resoluções espaciais e RMSEs dos produtos de sensoriamento remoto, os quais reduzem a acurácia posicional das geoformas vetorizadas e por conseguinte, a exatidão das mensurações e cálculos morfométricos baseados nesses dados geoespaciais.

A acurácia posicional indica a proximidade que o dado geoespacial está em relação à realidade do terreno (CRUZ; SANTOS, 2016). Ao utilizar produtos de sensoriamento remoto de diferentes origens e acurácias é recomendável a generalização para que se estabeleçam parâmetros de tolerância cartográfica com afinidade aos objetivos do trabalho (TOLENTINO et al. 2017).

Desse modo, optou-se pelo estabelecimento de uma tolerância para a seleção e interpretação dos resultados da morfometria, correspondente ao RMSE de 9,96 m. Assim, somente mensurações e cálculos com resultados menores ou iguais a –9,96 m e maiores ou iguais a 9,96 m, foram considerados relevantes e indicativos da ocorrência de ajustes. Após a determinação da tolerância, as geoformas vetorizadas obtidas na etapa anterior foram comparadas através de relações temporais entre um ano A (mais antigo) e um ano B (mais recente), sendo estabelecidas as relações: 1957-1978, 1978-2010 e 2010-2021. Para cada uma destas, procedeu-se com as etapas listadas a seguir (Figura 6).

a. Delineamento e mensuração da seção longitudinal (SL) do canal para os anos A e B das relações, ou seja, da linha que secciona o rio de montante para jusante na distância média entre as margens e delineamento de seções transversais (ST) à SL do ano A, em intervalos de 100 m;
b. Medição nas ST do deslocamento lateral entre as SL do ano A em relação ao ano B para identificação de ajuste de migração de canal, com cálculo da distância realizado através da função de geometria “$length” da Calculadora de Campo do software QGIS;
c. Mensuração nas ST das distâncias entre as margens fluviais nos anos das

relações, através da função “$length” e aplicação na Eq. (1), para identificação de ajustes (AJ) de expansão de canal (≥ 9,96 m) ou estreitamento de canal fluvial (≤ –9,96 m);

d. Determinação nas ST da largura das barras fluviais ativas com a função “$length” e aplicação na Eq. (1), para identificação de ajustes (AJ) expansão de barra (≥ 9,96 m) ou retraimento de barra fluvial (≤ –9,96 m):

$$AJ = STB(0+000) - STA(0+000) \quad (1)$$

Onde AJ é o processo de ajuste geomórfico; STB e STA são as seções transversais mensuradas nos anos B e A da relação; e (0+000) é a posição espacial das seções transversais ao longo do rio, sendo que a seção (0+000) corresponde ao ponto de partida (0.000 m) na montante do rio.

e. Cálculo da área total ocupada pelas barras nos anos A e B, através da função $area da Calculadora de Campo;

f. Fotointerpretação para nomenclatura dos ajustes identificados nas etapas anteriores;

g. Reconhecimento de baixo detalhe em campo, através de caminhamento em estradas e caminhamento paralelo ao *trend* (rio Itapocu), com o apoio da base correspondente às geoformas vetorizadas para o ano de 2021.

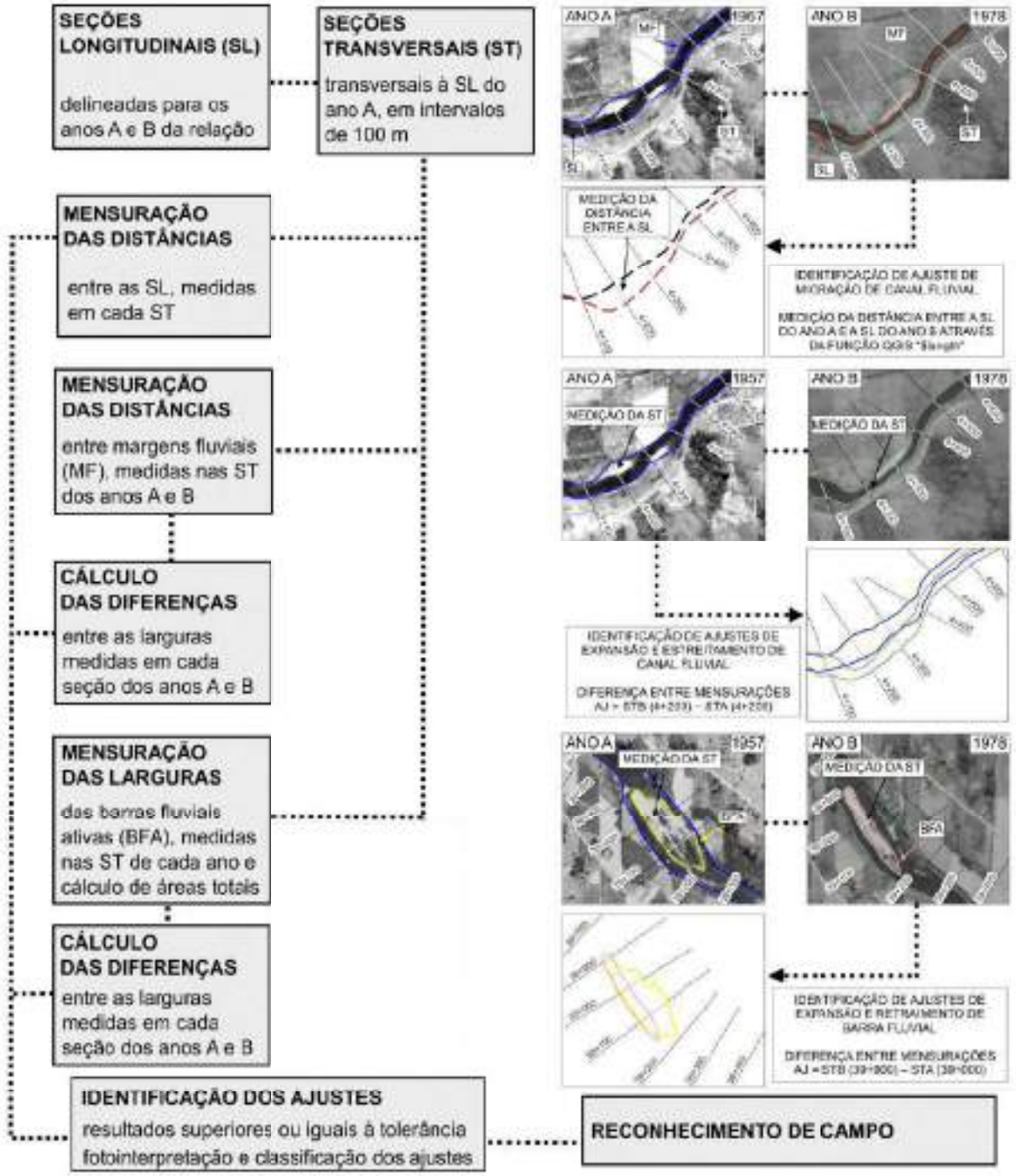
Os resultados da mensuração do deslocamento entre as SL (item 2), estão associados a ajustes de migração lateral do canal no fundo do vale fluviais. Havendo o deslocamento do rio em direção a uma das margens fluviais ou do vale, haverá deslocamento da SL na mesma direção. Esses resultados apresentam sinal positivo, pois correspondem a medições diretas da reta representada pela ST entre um ponto inicial (SL do ano A) e um ponto final (SL do ano B).

Os valores resultantes da aplicação da Eq. (1) (itens 3; 4), quando positivos, denotam que entre um ano A, pretérito e um ano B, relativamente mais recente, ocorreram ajustes de expansão em largura do canal fluvial ou de expansão em largura da barra fluvial. Os resultados com sinal negativo indicam ajustes associados ao estreitamento do canal ou à retração da barra fluvial paralelamente à ST, ou seja, na direção lateral.

O reconhecimento (item 7) e a compilação de dados (item 8), tiveram como

finalidade a complementação das descrições e caracterizações das geoformas mapeadas indiretamente no vale fluvial.

Figura 6 – Fluxograma explicativo dos procedimentos de identificação dos ajustes.



O reconhecimento (item 7), objetivou a validação preliminar e o registro fotográfico das paleoformas identificadas através de fotointerpretação. Portanto, corresponde a um levantamento geológico-geomorfológico prévio e de baixo

detalhe, realizado no primeiro semestre do ano de 2022, sem a aplicação de malha amostral padronizada ou de técnicas de campo para mapeamento sistemático.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão estruturados em geoformas do vale fluvial, onde são pormenorizados os produtos dos procedimentos de vetorização e mapeamento, reconhecidos e validados em campo; e ajustes geomórficos, abrangendo os procedimentos de morfometria dos dados geoespaciais e fotointerpretação para atribuição de significado.

3.3.1 Geoformas

Os procedimentos de vetorização, mapeamento e os trabalhos de campo, conduziram à determinação das geoformas associadas ao vale fluvial nas imediações da área de estudo, para cada uma das relações temporais. Estas geoformas foram, basicamente, agrupadas nos itens Vale Fluvial, Terraços e Planícies Fluviais, além de Canal Fluvial.

3.3.1.1 Vale Fluvial

O vale apresenta direção preferencial NW-SE com variações para WSW-ENE. Em sentido transversal, tem extensão mínima de 150 m nas imediações do bairro Amizade, em Jaraguá do Sul, e extensão máxima de 2.500 m na localidade de Guamiranga, em Guaramirim. A delimitação do vale ocorreu através da identificação das quebras de relevo correspondentes ao contato entre geoformas da dinâmica fluvial, definidas neste trabalho como unidades geomórficas Terraços Fluviais e Planícies de Inundação, e geoformas associadas aos processos morfodinâmicos das encostas rochosas. Estas, definidas como Embasamento Cristalino (Figura 7) e Terraços Colúvio-Aluvionares, as quais constringem os depósitos fluviais e limitam a expansão lateral do vale.

O contato torna-se menos nítido, conforme a proximidade com as coberturas sedimentares ligadas a ambientes costeiros, nas imediações da desembocadura do rio Putanga, entre os Municípios de Guaramirim e Araquari.

A unidade geomórfica Embasamento Cristalino, abrange formas de paisagem associadas aos metamorfitos e magmatitos, inclusive solos e saprólitos derivados, pertencentes ao Terreno Luís Alves e ao Grupo Itajaí. A unidade ocupa as encostas

das serranias adjacentes ao vale; ocorre como inselbergs nos Terraços Colúvio-Aluvionares, Terraços Fluviais e Planícies de Inundação; e aflora em *knickpoints* nas margens e no leito do rio Itapocu (Figura 7).

Figura 7 – Afloramentos de magmatitos nas imediações da confluência dos rios Humboldt e Novo, Corupá (A); e de metamorfitos nas proximidades da Ponte Alberto Bauer, Jaraguá do Sul (B).

Já as formas desenvolvidas nas encostas e sopés das serranias, associadas a sedimentos silicáticos imaturos, mal selecionados e variegados, oriundos de múltiplas áreas fontes de detritos e pertencentes à unidade litoestratigráfica Coberturas Sedimentares do Cenozoico, foram enquadrados na unidade geomórfica Terraços Colúvio-Aluvionares. Esta, especificamente abrange sistemas de leques aluviais coalescentes e coluviões de movimentos gravitacionais de massa.

3.3.1.1.1 Terraços e Planícies Fluviais

Geoformas características do fundo do vale, associáveis às Coberturas Sedimentares do Cenozoico e originadas em decorrência das alterações na dinâmica deposicional e erosiva do rio ao longo do tempo, foram agrupadas nas unidades geomórficas Terraços Fluviais e Planícies de Inundação (Figuras 8, 9, 10 e 11).

A unidade Terraços Fluviais abrange planícies de inundação abandonadas durante a evolução do rio, inclinadas em direção ao canal ativo na época de formação e dotadas de texturas e estruturas sedimentares reliquiares, oriundas da dinâmica fluvial pretérita. Engloba antigas barras fluviais, canais abandonados, dentre outras formas sedimentares e de relevo reliquiares, aplainadas por processos erosivos posteriores.

Figura 8 – Unidades geomórficas e vale fluvial para o ano de 1957.

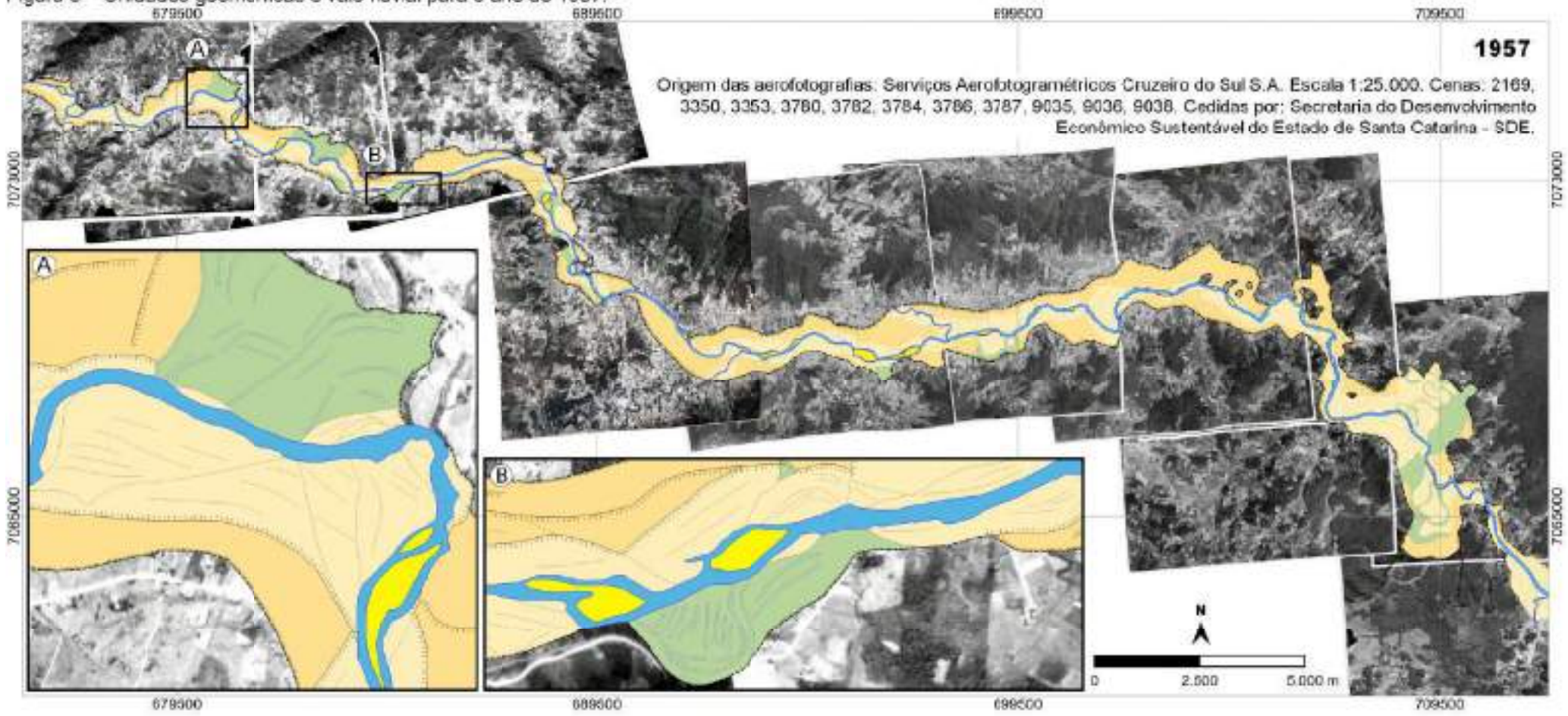


Figura 9 – Unidades geomórficas e vale fluvial para o ano de 1978.

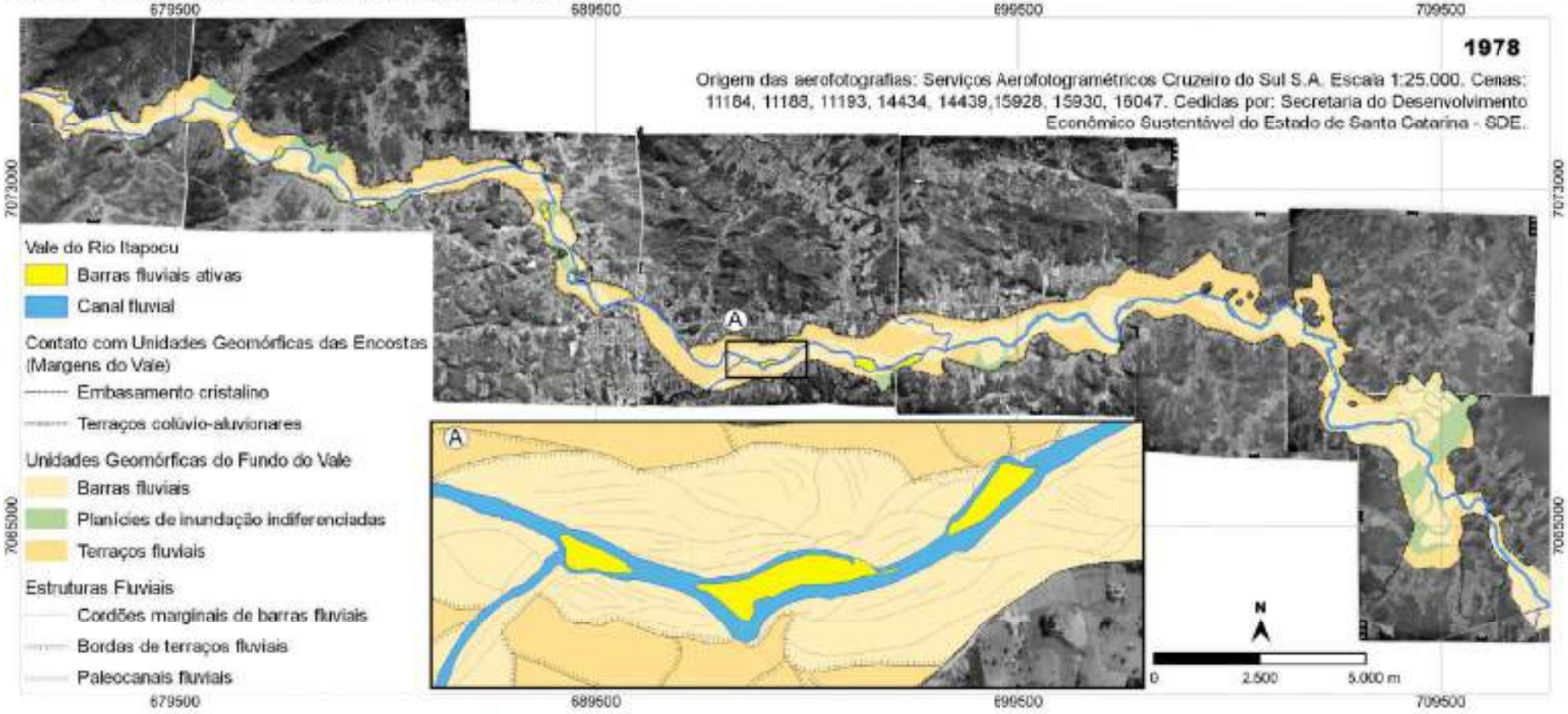


Figura 10 – Unidades geomórficas e vale fluvial para o ano de 2010.

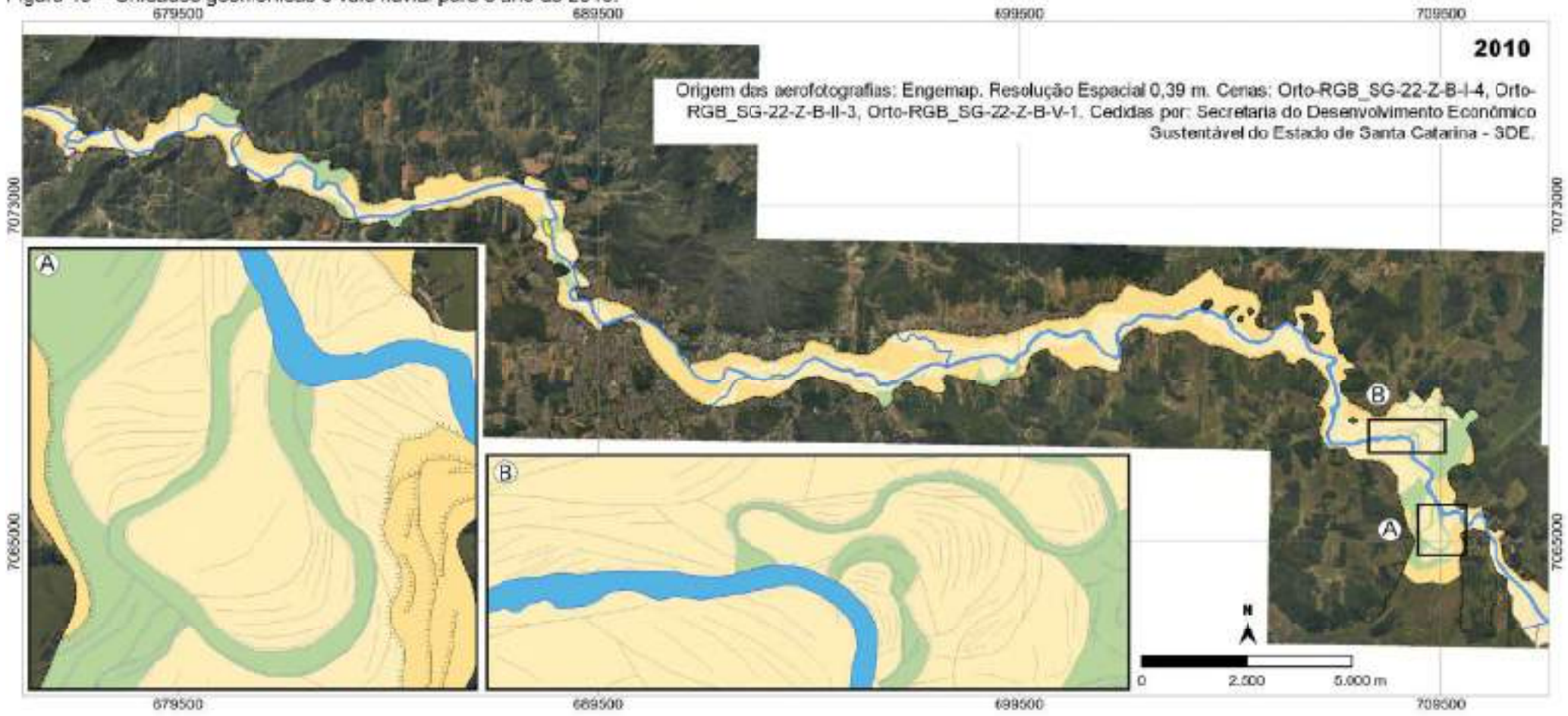
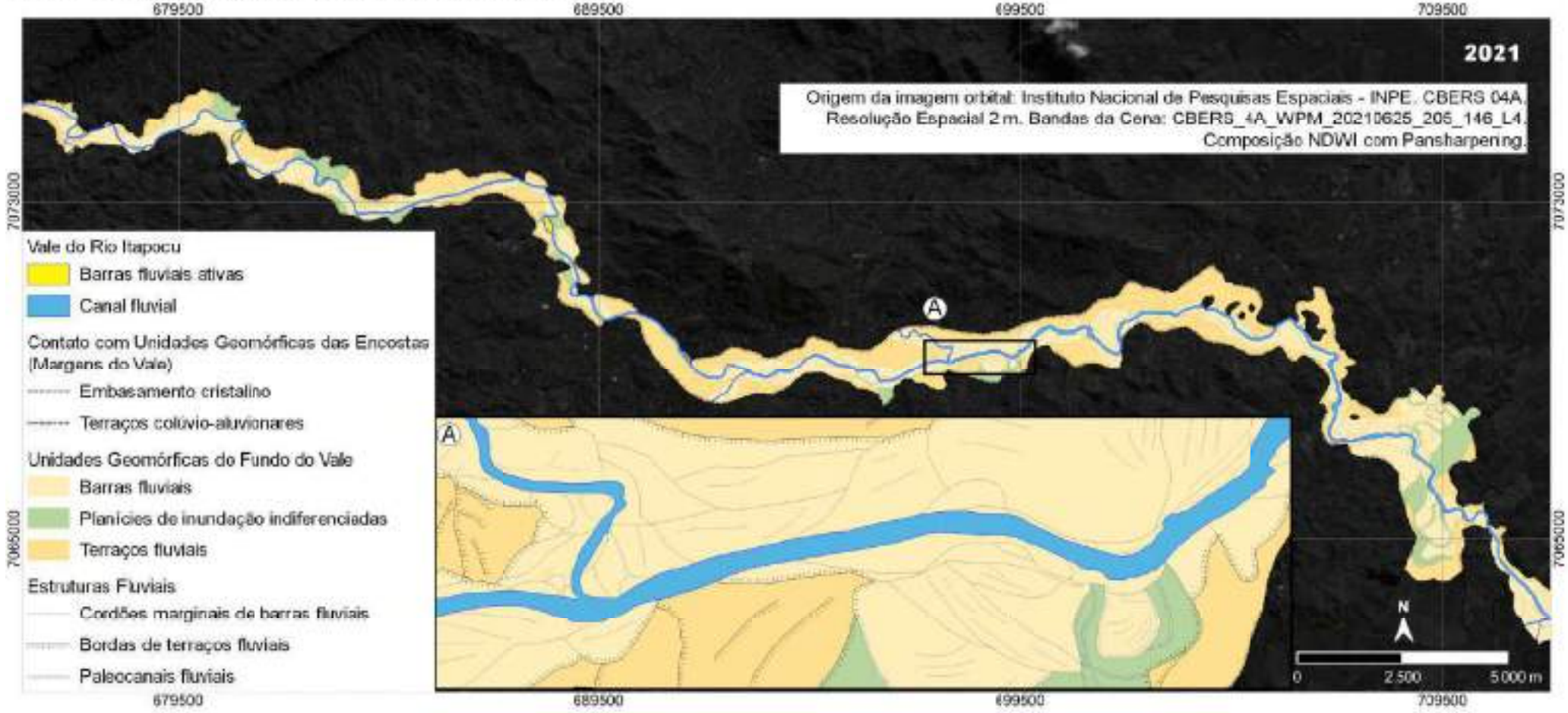


Figura 11 – Unidades geomórficas e vale fluvial para o ano de 2021.



Os Terraços Fluviais situam-se em patamares altimétricos acima das planícies atuais, das quais estão separados por quebras acantiladas de relevo, oriundas de migrações laterais e incisões de canal, neste trabalho nomeadas bordas de terraço. Estas, aplainadas por erosão e deposição gravitacional de sedimentos nos sopés, com consequente suavização das bordas acantiladas.

As formas de Planícies de Inundação, estão associadas à dinâmica recente do rio. São áreas sujeitas a inundações periódicas, suscetíveis aos processos deposicionais e erosivos da dinâmica do canal fluvial. A unidade foi dividida na subunidade Planícies de Inundação Indiferenciadas e subunidade Barras Fluviais.

As Planícies de Inundação Indiferenciadas abrangem formas associadas a paleocanais, meandros abandonados e barras fluviais inativas, colmatadas e aplainadas, indivisíveis das geoformas circunvizinhas em fotointerpretação (Figura 12).

Figura 12 – Subunidade Planícies de Inundação Indiferenciadas, dotada de paleocanal com margem e barra preservadas, sito à Rua Antônio Machado.

Já a subunidade Barras Fluviais corresponde a formas associadas a depósitos arenosos de canal, genericamente barras centrais e laterais, de pontal ou de meandro, abandonadas pela dinâmica do rio, incorporadas às Planícies de Inundação.

Essas formas de relevo, porém divisíveis através do reconhecimento de quebras de relevo, neste trabalho identificadas como cordões marginais de barras fluviais. Estes, estruturas lineares deposicionais e erosionais, associadas à formação da barra, subparalelas ao fluxo hídrico da época de formação do depósito (Figura 13).

Figura 13 – Contato aproximado das unidades Planícies de Inundação, subunidade Barras Fluviais, e Terraços Fluviais (A), com detalhe da margem arenosa do rio, instalada em barra incorporada à planície nas proximidades da Ponte Ricardo Grützmacher, Jaraguá do Sul (B).

As Planícies de Inundação e os Terraços Fluviais, em geral, são formados por corpos sedimentares reliquiares compostos por cascalho polimítico e areias líticas, análogos àqueles descritos no item a seguir. Estes, comumente recobertos por sedimentos argilo-siltosos a arenosos finos, associados à sedimentação da carga detrítica em suspensão em ambiente de baixa energia de transporte.

3.3.1.1.1 Canal Fluvial

A geoforma canal fluvial corresponde à calha normal do rio Itapocu, onde o escoamento superficial é permanente, sendo ocupada tanto no advento de estiagens, como em períodos de cheias, quando ocasionalmente pode ocorrer o transbordamento para as Planícies de Inundação. A calha é limitada por quebras de relevo relacionadas às cristas das margens fluviais e, frequentemente, apresenta corpos sedimentares emersos que compõe barras. Estas, podem ocasionar a divisão do canal em braços múltiplos.

Nos trabalhos de campo, observou-se que os sedimentos associados ao canal ativo estão assentados no Terreno Luis Alves e Grupo Itajaí, os quais podem aflorar em *knickpoints*. Majoritariamente, correspondem a cascalhos polimíticos e areias líticas (Figura 14), distribuídos no leito e nas barras ativas. Nestas, pode haver o recobrimento por sedimentos argilo-siltosos a arenosos finos de carga de suspensão. Tratam-se de depósitos pertencentes à unidade litoestratigráfica Coberturas Sedimentares do Cenozoico.

Os cascalhos são compostos por fragmentos silicáticos destacados de rochas de múltiplas áreas fontes, abrangendo das classes de argila ao matacão da Escala

de Udden-Wentworth (vide Nichols, 2009, p.7). Entretanto, predominam seixos (>4 a <64 mm) em matriz arenosa grossa a muito grossa (>0,5 a <2 mm). Já as areias variam de predominantemente finas a médias a até areias cascalhosas.

Figura 14 – Intercalações de cascalho e areia cascalhosa, margem fluvial próxima à Rua Augusto Schwarz (A); e de areias finas a médias em barra, topônimo Ilha Schubert, Jaraguá do Sul (B).

Entre a confluência dos rios Humboldt e Novo e o rio Itapocuzinho, predominam cascalhos e areias cascalhosas. A partir daquele até a desembocadura ao rio Putanga, predominam as areias cascalhosas e areias finas a médias. Estas, inclusive, predominam nas barras fluviais.

As relações temporais indicam que entre 1957 e 2021, o rio Itapocu sofreu encurtamento da SL, porém manteve padrões de direção concordantes com o vale. A SL apresentava comprimento de 52.753,59 m em 1957; 52.899,71 m em 1978; 52.474,322 m em 2010; e de 52.344,948 m em 2021. Na relação 1957-1978 houve extensão da SL em 146,11 m; em 1978-2010 houve encurtamento de 425,38 m; e na relação 2010-2021 de 129,37 m. Ademais, as barras fluviais ativas apresentaram redução em área (Figura 15).

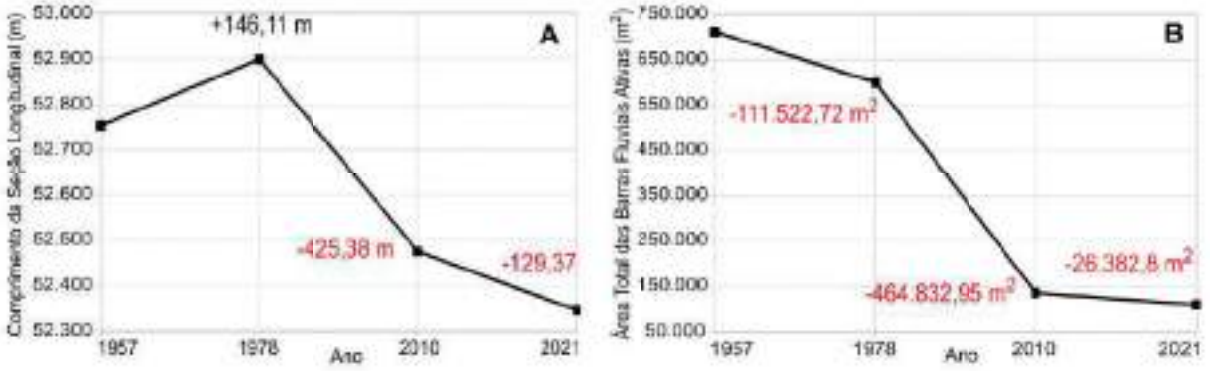
Em 1957, a área total ocupada pelas barras era de 710.942,32 m^2; em 1978 de 599.419,60 m^2; em 2010 de 134.586,65m^2; e em 2021 de 108.203,85 m^2. Entre 1957 e 1978 houve decréscimo de 111.522,72 m^2; entre 1978 e 2010 de 464.832,95 m^2; e entre 2010 a 2021 de 26.382,80 m^2.

3.3.2 Ajustes Geomórficos

Nas relações temporais 1957-1978, 1978-2010 e 2010-2021, foram identificadas nove formas de ajuste. Três relacionadas a modificações na geometria

e posição espacial do rio, denominadas Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf) e Estreitamento de Canal Fluvial (SCf). Duas associadas a modificações nas barras, denominadas Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf) e Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf).

Figura 15 – Gráficos das variações interanuais no comprimento das seções longitudinais (A); e na área total das barras ativas (B).



Além disso, a fotointerpretação dos segmentos que sofreram esses ajustes, proporcionou a identificação adicional de quatro tipos de modificações associados às barras e às formas em planta das curvas do canal. Estas, denominadas Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação (IBf), Rotação de Curva Fluvial (RCv), Translação de Curva Fluvial (TCv) e Deslocamento Lateral da Curva Fluvial (DCv).

3.3.2.1 Caracterização dos Ajustes na Geometria e Posição Espacial do Canal

Correspondem aos ajustes Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf) e Estreitamento de Canal Fluvial (SCf) (Figura 16), definidos em concordância com as classificações propostas por Brierley e Fryirs (2005); Fryirs, Spink e Brierley (2009).

A MCf implica na modificação da posição espacial da SL, provocando a extensão ou o encurtamento desta. Corresponde ao deslocamento lateral do canal no fundo do vale (BRIERLEY; FRYIRS, 2005). Esse movimento ocorre em direção a uma das margens fluviais, provocando o deslocamento desta e o retrabalho das geoformas fluviais adjacentes. Na circunvizinhança da margem oposta ao movimento, ocorre a ampliação e o surgimento de novas geoformas. Nessas áreas, há o abandono e a incorporação de barras e braços múltiplos do canal às Planícies

de Inundação.

O alargamento do canal em resposta à dominância de processos erosivos em uma ou ambas as margens, sem que o eventual influxo de sedimentos seja capaz de compensar as perdas decorrentes, corresponde a ajuste de expansão (BRIERLEY; FRYIRS, 2005; FRYIRS; SPINK; BRIERLEY, 2009). A ECf ocorre no sentido transversal ao vetor médio do fluxo hídrico, portanto, transversal à SL e subparalela às ST. Implica no incremento da distância entre margens fluviais opostas e no retrabalho das geoformas dos Terraços Fluviais e Planícies de Inundação.

A MCf e a ECf são limitados pelo contato com as geoformas associadas às encostas rochosas, quando a expansão tende para o sentido destas.

Já o estreitamento corresponde ao processo de constrição do canal, influenciado pelo influxo de sedimentos em uma ou ambas as margens (BRIERLEY; FRYIRS, 2005; FRYIRS; SPINK; BRIERLEY, 2009). O SCf ocorre no sentido transversal ao vetor médio do fluxo hídrico, implica no decréscimo da distância entre as margens e no aporte de sedimentos que suplanta eventuais processos erosivos, ocasionando a expansão em área da Planície de Inundação adjacente ao rio. O movimento de constrição é oposto às margens caracterizadas pelo contato com geoformas associadas às encostas rochosas.

3.3.2.2 Caracterização dos Ajustes Associados às Barras Fluviais

Englobam a Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf) e Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf), os quais modificam a geometria das barras fluviais ativas, e à Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação (IBf) (Figura 17). Esta, associada ao abandono das barras e inserção na planície. Correspondem a ajustes, definidos neste trabalho, em vista dos processos de modificação observados no rio Itapocu através das relações temporais.

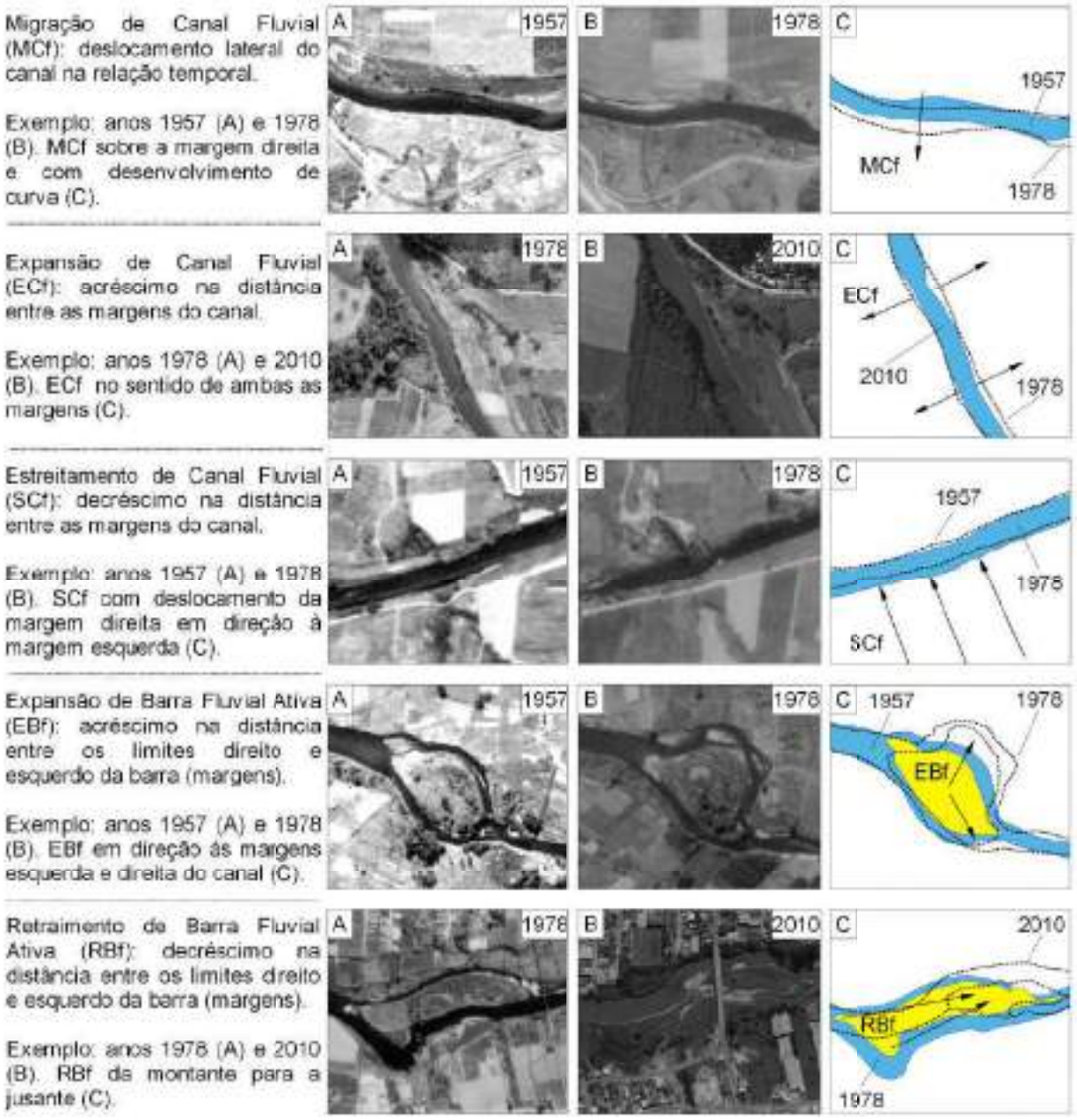
Os ajustes EBf e RBf ocorrem no sentido transversal ao vetor médio do fluxo hídrico, semelhante aos ajustes de canal ECf e SCf. Apresentar associação com processos de migração de barra na direção do vetor médio do fluxo hídrico, ou seja, subparalelos à SL, para a montante ou a jusante do rio. Porém, a migração é processo inusual, com ocorrência restrita ao longo do período total de observação (1957 a 2021).

A EBf implica na formação de novas barras, ou no crescimento em áreas nas barras preexistentes. Por outro lado, a RBf implica no decréscimo em área das

barras ativas e, em geral, envolve processos de retilinização do canal.

A forma IBf é um ajuste derivado da RBf que identifica a estabilização da barra ativa, seguida da incorporação parcial ou total desta à Planície de Inundação e desincorporação da calha normal, onde há escoamento superficial permanente. Frequentemente a IBf envolve a retilinização e estreitamento local do canal, além do abortamento e colmatação dos braços múltiplos de canal, favorecendo o desenvolvimento de canal fluvial singular (Figura 17).

Figura 16 – Formas de ajuste identificadas na área de estudo, associadas ao canal e às barras fluviais.

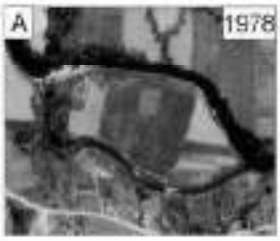
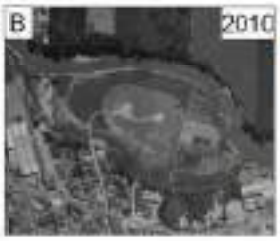
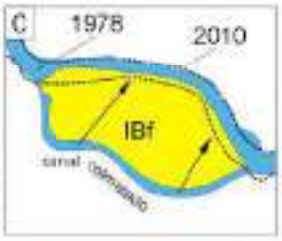
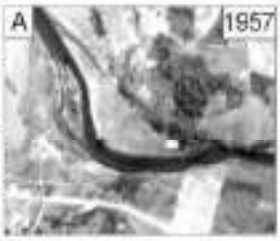
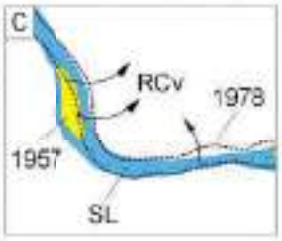
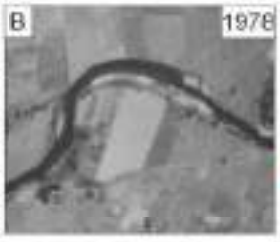
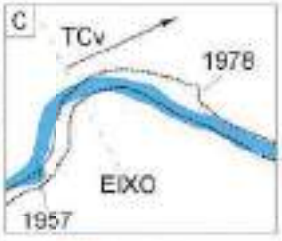
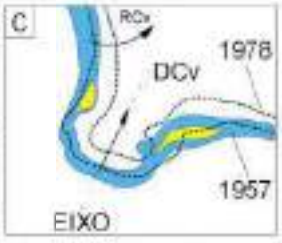


3.3.2.3 Caracterização dos Ajustes Associados às Curvas Fluviais

Tratam-se de ajustes em que há modificação na forma em planta das curvas fluviais, ou de formação de curvatura no canal, derivados do ajuste MCf. Estas, denominados Rotação de Curva Fluvial (RCv), Translação de Curva Fluvial (TCv) e Deslocamento Lateral da Curva Fluvial (DCv) (Figura 17). Destes, os ajustes RCv e TCv são análogos aos modelos *bend rotation* e *bend translation* constantes em Brierley e Fryirs (2005), Fryirs, Spink e Brierley (2009), enquanto o DCv é parcialmente análogo à extensão de curva (*bend extension).*

Ajustes associados a curvas fluviais correspondem a fenômenos de migração da trajetória do canal devido a obstruções, como o encontro com o embasamento do vale e sedimentos coesivos, produzindo distintos padrões de curvatura no canal (BRIERLEY; FRYIRS, 2005).

Figura 17 – Formas de ajuste identificadas na área de estudo, associadas às barras e às curvas do canal fluvial.

Incorporação de Barra à Planície de Inundação (IBf): estabilização e incorporação da barra à Planície de Inundação. Exemplo: anos 1978 (A) e 2010 (B). IBf com abandono de subcanal (C).			
Rotação de Curva Fluvial (RCv): rotação da seção longitudinal (SL) do canal. Exemplo: anos 1957 (A) e 1978 (B). RCv com aproximação das alças e alteração na forma do meandro (C).			
Translação de Curva Fluvial (TCv): deslocamento da curva para a montante ou a jusante, sem alteração da forma. Exemplo: anos 1957 (A) e 1978 (B). TCv com deslocamento para jusante (C).			
Deslocamento Lateral da Curva Fluvial (DCv): deslocamento lateral da curva em direção a uma das margens. Exemplo: anos 1957 (A) e 1978 (B). DCv com deslocamento para a margem esquerda (C).			

A RCv implica no processo de migração (MCf) associado à rotação da SL, com desenvolvimento de curvaturas em trechos aproximadamente retilíneos. No caso de curvatura preexistente, implica no deslocamento lateral do eixo de inflexão da curva, com modificação da morfologia desta quando vista em planta ou no plano.

Na TCv há o deslocamento ordenado e integral da curva e do eixo de inflexão no sentido da montante ou da jusante do rio. Portanto, há a modificação na posição espacial da curva, sem alteração morfológica significativa, mantendo-se uma forma básica ao longo do tempo.

No DCv, há o deslocamento lateral da curva ao longo do eixo de inflexão, em direção a quaisquer das margens do rio. Porém, mantendo-se aproximadamente a direção do eixo, sem rotação ou alteração significativa na forma em planta da curva. Na extensão de curva (*bend extension*), há o deslocamento lateral da curvatura com consequente incremento na amplitude desta (BRIERLEY; FRYIRS, 2005; FRYIRS; SPINK; BRIERLEY, 2009).

O ajuste DCv engloba esse processo e abrange as situações inversas, nas quais há a progressiva diminuição da amplitude da curva, com uma tendência à retilinização desta. Porém, sem que envolva ajuste com estrangulamento de meandro (*chute cutoff).* Este processo, registrado nas geoformas do fundo do vale fluvial, porém, cuja ocorrência não foi constatada ao longo do período de análise das modificações paisagísticas sofridas pelo canal fluvial (1957-2021).

3.3.3 Representatividade e Interações entre Formas de Ajustes

Para as relações temporais 1957-1978, 1978-2010 e 2010-2021, foram delineadas 528, 530 e 525 ST à SL. Nestas, houve predomínio do ajuste MCf (Figura 18). Entretanto, através da metodologia desenvolvida, identificou-se os ajustes geomórficos, se desenvolvem simultaneamente no canal fluvial, ocorrendo em diferentes locais ao longo do rio, no sentido longitudinal da montante para a jusante. Além disso, houve o reconhecimento de que determinadas formas de ajustes estão comumente relacionadas e ocorrem simultaneamente em uma ST. A seguir, são apresentados os resultados concernentes à representatividade dos ajustes e suas interações ao longo das relações temporais.

3.3.3.1 Relação Temporal 1957-1978

Na relação 1957-1978, houve o delineamento de 528 ST, nas quais

predominou o ajuste MCf, constatado em 195 ST (37,5%). Ajustes ECf e SCf ocorreram em 83 (15,7%) e 91 (17,2%) das 528 ST, enquanto 189 (35,8%) não sofreram modificações. Casos de ST que apresentaram mais de uma forma de ajuste, foram 131 (24,8%) (Figura 18).

Dentre as 528 ST da relação, 145 (27,5%) transeccionaram barras fluviais ativas. Nestas, a EBf ocorreu em 38 ST (26,2%), a RBf em 60 (41,4%), 47 (32,4%) não sofreram modificações e 71 (49,0%) apresentam mais de uma forma de ajuste (Figura 19).

Casos de migração do canal associado ao desenvolvimento ou ao deslocamento de curva fluvial, identificados como RCv, TCv ou DCv, ocorreram em 67 (33,8%), 20 (10,1%) e 28 (14,1%) das 195 ST de MCf. Por outro lado, o ajuste IBf ocorreu em 32 (53,3%) das 60 ST com RBf (Figura 20).

Daquelas 131 (24,8%) ST que apresentaram mais de uma forma de ajuste (Figura 18), a associação MCf-ECf ocorreu em 30 (22,9%), a MCf-SCf em 30 (22,9%), a MCf-SCf-RBf em 26 (19,8%) e a MCf-ECf-EBf em 12 ST (9,2%), totalizando a 74,8% das 131 ST.

Os demais 25,2% ou 33 ST, englobam as associações ECf-EBf, MCf-RBf, SCf-RBf, MCf-EBf, ECf-RBf, MCf-SCf-EBf, SCf-RBf e MCf-ECf-RBf (Figura 21). As associações com MCf, englobam os casos de RCv, DCv e TCv.

No caso específico das 71 (49,0%) ST em barras com mais de uma forma de ajuste (Figura 19), predominaram as associações MCf-SCf-RBf em 26 (36,6%), MCf-ECf-EBf em 12 (16,9%) e ECf-EBf em 8 ST (11,3%). Estas, correspondentes a 64,8% das 71 ST. As demais 25 ST (35,2%), distribuem-se entre MCf-RBf, SCf-RBf, MCf-EBf, ECf-RBf, MCf-SCf-EBf, SCf-EBf e MCf-ECf-RBf (Figura 21). As associações com RBf englobam as ocorrências de IBf.

3.3.3.2 Relação Temporal 1978-2010

Para 1978-2010, houve predomínio do ajuste MCf em 201 (37,9%) das 530 ST. A ECf e a SCf ocorreram em 109 (20,6%) e 106 ST (20,0%). Não foram constatadas modificações em 170 (32,1%), enquanto 144 ST (27,2%) apresentaram mais de uma forma de ajuste (Figura 18).

Do total das 530 ST, 100 (18,9%) transeccionam barras. Nestas, a EBf ocorreu em 10 ST (10,0%), a RBf em 78 (78,0%), 12 ST (12,0%) não sofreram modificações e 81 (81,0%) apresentam mais de um ajuste (Figura 19).

Ajustes RCv, TCv e DCv, ocorreram em 72 (35,8%), 9 (4,5%) e 53 ST (26,4%) das 530 ST caracterizadas por MCf. A IBf ocorreu em 47 (60,3%) das 78 ST com RBf (Figura 20).

3.3.3.3 Relação Temporal 2010-2021

Na relação 2010-2021, houve MCf em 184 (35,0%) das 525 ST. A ECf e a SCf ocorreram em 23 (4,4%) e 98 ST (18,7%) das 525 ST. Não houve modificações em 261 (49,7%) e 54 (10,3%) apresentaram mais de um ajuste (Figura 18).

Já entre as 81 ST (81,0%) em barras que apresentam mais de um ajuste (Figura 19), a MCf-SCf-RBf ocorreu em 44 (53,3%), a MCf-ECf-EBf em 8 (9,9%) e a SCf-RBf em 16 (19,8%), um total de 84,0%. As demais 13 ST (16,0%) estão distribuídas entre MCf-RBf, MCf-EBf, ECf-RBf e MCf-ECf-RBf (Figura 21). As associações com RBf englobam a IBf.

Figura 18 – Gráficos da representatividade dos ajustes de Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf), Estreitamento de Canal Fluvial (SCf), das Seções Transversais (ST) que não apresentaram ajustes e daquelas com mais de um tipo de ajuste geomórfico.

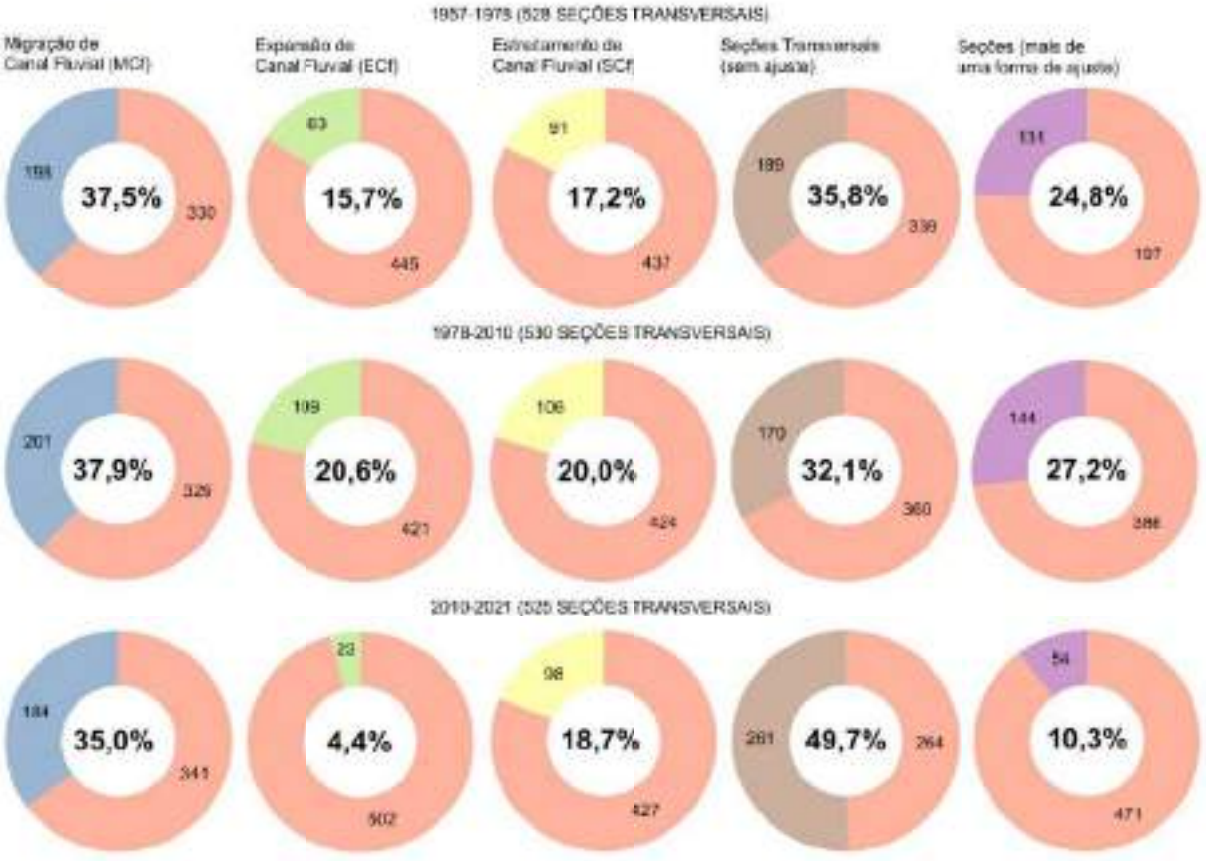


Figura 19 – Distribuição das Seções Transversais (ST) que transeccionam barras fluviais. Representatividade dos ajustes Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf) e Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf). Distribuição das seções que não apresentaram ajustes em barras e daquelas com ajustes associados nas barras e no canal.

As principais associações foram MCf-ECf em 45 (31,3%), MCf-SCf em 18 (12,5%), MCf-SCf-RBf em 44 (30,6%) e SCf-RBf em 16 (11,1%), correspondendo a 85,4% das 144 ST com mais de uma forma de ajuste. Outras associações (MCf-ECf-EBf, MCf-RBf, MCf-EBf, ECf-RBf e MCf-ECf-RBf) totalizam 14,6% ou 21 ST (Figura 21). As associações com MCf, englobam os casos de RCv, DCv e TCv.

Daquelas 525 ST, 23 (4,4%) transeccionam barras. Dentre estas, a EBf ocorreu em 5 (21,7%) e a RBf em 8 (34,8%), enquanto 10 ST (43,5%) não sofreram modificações. Por outro lado, 9 (39,1%) estão associadas a mais de um ajuste (Figura 19).

A RCv, TCv e DCv ocorreram em 27 (14,7%), 8 (4,3%) e 111 (60,3%) das 184 ST com ajuste MCf. A IBf ocorreu em 5 (62,5%) das ST com RBf (Figura 20).

As principais associações foram MCf-ECf em 9 ST (16,7%), MCf-SCf em 36 (66,7%) e MCf-SCf-RBf em 3 (5,6%), totalizando 88,9% das 54 ST com mais de um ajuste. Outras associações (ECf-EBf, SCf-RBf, MCf-EBf, MCf-SCf-EBf e MCf-ECf-

RBf) somam 11,1% ou 6 ST (Figura 21). As associações com MCf, englobam os casos de RCv, DCv e TCv.

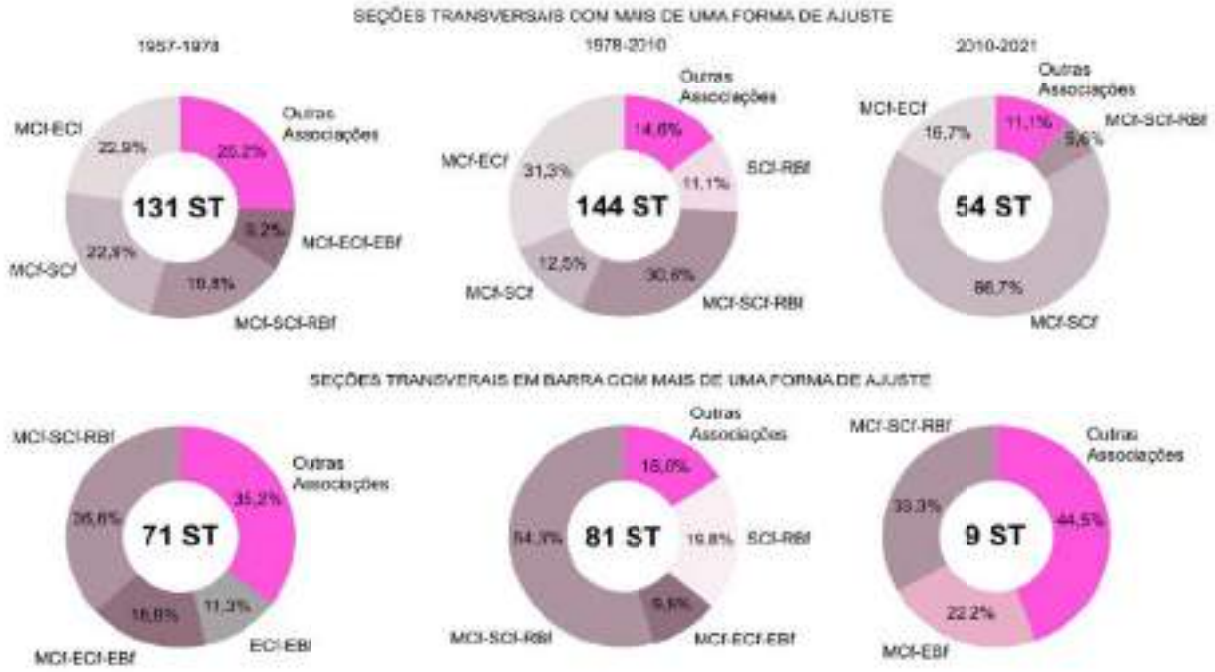
Nas ST em barras, houve MCf-SCf-RBf em 3 (33,3%) e MCf-EBf em 2 (22,2%), correspondentes a 56,6% das 9 ST com mais de um ajuste. Outras 4 ST (44,5%) estão distribuídas entre ECf-EBf, SCf-RBf, MCf-SCf-EBf e MCf-ECf-RBf (Figura 21). As associações RBf englobam a IBf.

3.3.3.4 Distribuição dos Ajustes entre 1957 e 2021

Entre os anos de 1957 e 2021, sofreu ajustes geomórficos associados ao canal fluvial, classificados como: Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf) e Estreitamento de Canal Fluvial (SCf).

Figura 20 – Gráficos da representatividade dos ajustes Rotação de Curva Fluvial (RCv), Translação de Curva Fluvial (TCv), Deslocamento Lateral de Curva Fluvial (DCv), em relação ao total de Seções Transversais (ST) com ajuste Migração de Canal Fluvial (MCf). Representatividade do ajuste Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação (IBf), em relação às seções com ajuste Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf).

Figura 21 – Gráficos da representatividade das principais associações entre ajustes geomórficos, considerando o total de Seções Transversais (ST) com mais de um ajuste em cada relação temporal, conforme consta na Figura 16.



Quanto às barras fluviais, os ajustes foram: Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf), Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf), Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação (IBf). Ajustes associados a curvaturas fluviais foram: Rotação de Curva Fluvial (RCv), Translação de Curva Fluvial (TCv) e Deslocamento Lateral da Curva Fluvial (DCv).

Entre 1957 e 1978, predominaram os ajustes de canal MCf e SCf. Nos casos de MCf associada ao desenvolvimento ou ao deslocamento de curva fluvial, predominou a RCv. Nas barras ativas houve predomínio da RBf, frequentemente relacionada à IBf. As principais formas de ajustes em associação, simultaneamente identificadas em uma ST do rio, foram MCf-ECf, MCf-SCf, MCf-SCf-RBf e MCf-ECf-EBf. A MCf-SCf-RBf correspondeu à principal associação identificada em barras fluviais.

Entre 1978 e 2010, predominaram os ajustes MCf e ECf. Quanto às curvas fluviais, predominaram a RCv e o DCv. Nas barras, a RBf e a IBf se destacaram. As principais associações corresponderam a MCf-ECf, MCf-SCf-RBf, MCf-SCf e SCf-RBf. A MCf-SCf-RBf correspondeu à principal associação identificada em barras fluviais.

Já para o intervalo entre 2010 e 2021, houve domínio da MCf e da SCf, além

da DCv. Nas barras, predominou a RBf e a IBf. As principais associações foram MCf-SCf, MCf-ECf e MCf-SCf-RBf. Esta, dominante nas barras.

Portanto, as principais formas observadas entre as relações temporais foram MCf, SCf e RBf. Entretanto, essas formas não ocorrem isoladamente. As associações predominantes foram MCf-ECf e MCf-SCf, enquanto nas barras predominou a MCf-SCf-RBf. Observa-se que a IBf não foi constatada nas imediações de locais com processos de ECf e EBf. Desse modo, a IBf corresponde a uma forma de ajuste associada exclusivamente a casos de RBf com associação a MCf e SCf. Processos de ECf e EBf são incompatíveis com a IBf.

Ademais, entre 1957 e 2021, houve a tendência de predomínio de ajustes centrados em MCf, SCf e RBf, com redução dos casos de ECf e EBf.

Esses padrões de ajustes denotam uma tendência espaço-temporal à migração e ao estreitamento do canal, conduzindo a uma progressiva retilinização das curvas, acompanhada da retração e da incorporação de barras às planícies adjacentes ao rio. Essa tendência é corroborada pelo encurtamento da SL do rio entre 1957 (52.753,59 m) e 2021 (52.344,948 m), além da redução na área total das barras que em 1957 era de 710.942,32 m^2 e em 2021 correspondia a 108.203,85 m^2. Considera-se que esses padrões denotam uma tendência à retilinização natural do canal com progressiva erosão e incorporação das barras às Planícies de Inundação. Aventa-se que esse processo esteja relacionado a dinamismos naturais de alto impacto recentes e porventura atuais, oriundos de mudanças climáticas e/ou neotectônica, conforme indica Gimenez et al. (2022).

Dentre os ajustes identificados, não houve a constatação de modificações associadas ao estrangulamento e abandono de meandros. Considera-se que indícios de meandros abandonados nas Planícies de Inundação, tiveram formação anterior a 1957. Inclusive, nas proximidades da localidade de Guamiranga, em Guaramirim, constatou-se um paleocanal em acentuado processo de colmatação, denominado rio Poço Grande. Este, associado a um trecho de planície à margem esquerda do rio Itapocu, característica pelos meandros abandonados e remanescentes de barras fluviais. O paleocanal está associado a um remanescente ativo de canal, sem ligação com o rio Itapocu, porém conflui com o rio Piraí, um afluente com desembocadura no Município de Araquari, além dos limites da área de estudo.

3.4 CONCLUSÕES

Ajustes geomórficos correspondem a modificações na geometria das geoformas da paisagem. Usualmente, diferentes formas de ajustes geomórficos ocorrem simultaneamente em um mesmo ambiente fluvial.

Os ajustes geomórficos identificados através das relações temporais estabelecidas entre os anos de 1957, 1978, 2010 e 2021, correspondem a modificações morfológicas nas formas da paisagem associadas ao rio. Essas modificações não foram analisadas quanto aos fatores de origem. Desse modo, correspondem a alterações na geometria da paisagem fluvial, independentemente dos fatores ambientais de origem.

Os fatores de origem podem abranger desde eventos extremos de origem meteorológica, eventos extremos de origem neotectônica, até modificações no uso e na ocupação do solo em diferentes regiões da bacia hidrográfica e do vale fluvial.

Entre 1957 e 2021, o rio Itapocu apresentou acentuado processo de redução em área das barras fluviais ativas, além de um processo de retilinização natural do canal. A existência de planícies caracterizadas por meandros abandonados e canais abortados anteriormente a 1957, denotam que esse processo é lento e é anterior ao período de estudo.

Ademais, a fotointerpretação propiciou o mapeamento primário do vale fluvial, definindo geoformas e unidades geomórficas básicas que poderão servir aos futuros trabalhos que almejem detalhar a unidade litoestratigráfica Coberturas Sedimentares do Cenozoico, estudar fácies sedimentares associadas aos processos deposicionais do rio Itapocu e, porventura, mudanças paleoclimáticas e processos neotectônicos na região.

O método fotointerpretativo e morfométrico aplicado mostrou-se eficaz para a determinação de ajustes geomórficos. Entretanto, os procedimentos adotados neste trabalho podem ser refinados em futuras pesquisas. Além disso, este trabalho poderá servir como subsídio para pesquisas que visem associar modificações na paisagem fluvial ao regime de precipitação e a alterações nos padrões de uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas, dentre outras situações e fenômenos que possam desencadear desequilíbrios nos sistemas fluviais e nas geoformas da paisagem fluvial.

3.5 REFERÊNCIAS

AMVALI – Associação dos Municípios do Vale do Itapocu. **Atlas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapocu**. Jaraguá do Sul: AMVALI, 2015.

ARCANJO, J. B. A. **Fotogeologia: conceitos, métodos e aplicações**. Salvador, BR: CPRM/SBG, 144p. 2011.

BASEI, M. A. S.; NUTMAN, A.; SIGA-JÚNIOR, O.; PASSARELLI, C. R.; DRUKAS, C. O. The Evolution and Tectonic Setting of the Luis Alves Microplate of Southeastern Brazil: An Exotic Terrane during the Assembly of Western Gondwana. In: GAUCHER, C.; SIAL, A. N; FRIMMEL, H. E.; HALVERSON, G. P. **Developments in Precambrian Geology**. Elsevier, 2009. Chapter 7.2. p.273–291.

BERTRAND, M.; PIÉGAY, H.; PONT, D.; LIÉBAULT, F.; SAUQUET, E. Sensitivity analysis of environmental changes associated with riverscape evolutions following sediment reintroduction: geomatic approach on the Drôme river network, France. **International Journal of River Management**, v.11, n.1, p.19-32. 2013.

BRUNSDEN, D.; THORNES, J. B. Landscape sensitivity and change. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v.4, n.4, p.463-484. 1979.

BRIERLEY, G. J.; FRYIRS, K. A. **Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework**. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 398p. 2005.

BRIERLEY, G.; FRYIRS; K.; MARÇAL, M. S.; LIMA, R. The use of the river styles framework as a tool to ‘work with nature’ in managing rivers in Brazil: examplex from the Macaé catchment. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.20, n.4, p.751-771. 2019.

BURAAS, E. M.; RENSHAW, C. E.; MAGILLIGAN, F. J.; DADE, W. B. Impact of reach geometry on stream channel sensitivity to extreme floods. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.39, p.1778-1789. 2014.

COSTA, M. S. **A sedimentação neoproterozoica na bacia do Itajaí, leste de Santa Catarina**: paleoambientes, composição e diagênese de arenitos. 2014. 290p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

CPRM. **Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina**. Brasília: CPRM, 2014. Escala 1:500.000.

CRUZ, D. T.; SANTOS, A. P. Análise da acurácia posicional planimétrica da hidrografia numérica extraída do MDS SRTM banda X na região do Pantanal Mato-Grossense. In: 6º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2016, Cuiabá. **Anais…** Cuiabá: Embrapa Informática Agropecuária/INPE. 2016. p. 124-132.

FRYIRS, K. A.; SPINK, A.; BRIERLEY, G. Post-European settlement response gradientes of river sensitivity and recovery across the upper Hunter catchment, Australia. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.34, p.897-918. 2009.

FRYIRS, K.; LISENBY, P.; CROKE, J. Morphological and historical resilience to catastrophic flooding: the case of Lockyer Creek, SE Queensland, Australia. **Geomorphology**, v.241, p.55-71. 2015.

FRYIRS, K. A. River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.42, p.55-70. 2017.

GIMENEZ, V. B.; SALAMUNI, E.; SANTOS, J. M.; PEYERL, W. R. L.; FARIAS, T. F. S.; SANCHES, E. The role of fault reactivation in the geomorphological evolution of coastal landforms on passive continental margins: Evidence from a tectonic estuary in southern Brazil. **Geomorphology**, 402: p.10832. 2022.

KAUL, P. F. T. **O magmatismo da Serra do Mar e adjacências (sul do Brasil) no final do Proterozoico e seus condicionantes tectônicos**. 1997. 290p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

KLEINA, M. & SANTOS, L. J. C. Sensitividade Fluvial da Drenagem Principal da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado – Serra do Mar Paranaense. **RA'E GA – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 41, p. 174-188. 2017.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.7, p.1425-1432. 1996.

NICHOLS, G. **Sedimentology and Stratigraphy**. Chichester, UK: Wiley-Blackwell, 432 p. 2009.

QGIS Development Team. QGIS **Geographic Information System (versão 3.20)**. 2021. Disponível em: <http://qgis.org>.

REID, H. E.; BRIERLEY, G. J. Assessing geomorphic sensitivity in relation to river capacity for adjustment. **Geomorphology**, v.251, p.108-121. 2015.

RODRIGUES, J. M.; SOUZA, J. O. P. Tipologia de canais fluviais como mecanismo de identificação da sensitividade e potencial de recuperação em uma bacia de drenagem no semiárido paraibano – Município de São João do Tigre (PB). **Revista de Geociências do Nordeste**, v.6, n.2, p.266-275. 2020.

SANTOS, R. C.; MARÇAL, M. S. Caracterização dos ajustes e mudanças na morfologia do rio São João, região das baixadas litorâneas do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.22, n.1, p.149-162. 2021.

SIGA-JÚNIOR, O. **Domínios tectônicos do sudeste do Paraná e nordeste de Santa Catarina**: geocronologia e evolução crustal. 1995. 212p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995.

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

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de

fotografias aéreas em geologia. **Notícias Geomorfológicas**, v.6, n.32, p.71-104, 1976.

TOLENTINO, F. M.; SILVA, C. R.; SANTIL, F. L. P. Avaliação da acurácia posicional de redes de drenagem obtidas a partir de modelos SRTM e ASTER com o uso dos softwares ARCGIS e QGIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.69, v.7, p.1287-1301, 2017.

VIEIRA, M. N. **Vetorização e análise de tendências de cartas de lineamentos geológicos**. 1998. 97p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1998.

VILLAS-BOAS, G. H.; MARÇAL, M. S. Avaliação da sensitividade do sistema fluvial no alto-médio vale do rio Macaé (RJ). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n1, p.93-102. 2013.

WHEATON, J. M.; FRYIRS, K.; BRIERLEY, G.; BANGEN, S. G.; BOUWES, N.; O'BRIEN, G. Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms. **Geomorphology**, v.245, p.273-295. 2015.

4 RELAÇÕES ENTRE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E AJUSTES GEOMÓRFICOS NA PAISAGEM DO RIO ITAPOCU, REGIÃO NORDESTE DE SANTA CATARINA

Este capítulo corresponde ao manuscrito Relações entre Extremos de Precipitação e Ajustes Geomórficos na Paisagem do Rio Itapocu, Região Nordeste de Santa Catarina, submetido no dia 14/02/2022 à revista *Resources, Environment and Sustainability* (ISSN 2666-9161), publicação da Elsevier (Figuras 22 e 23).

Figura 22 – Espelho da página de submissões da revista *Resources, Environment and Sustainability*.

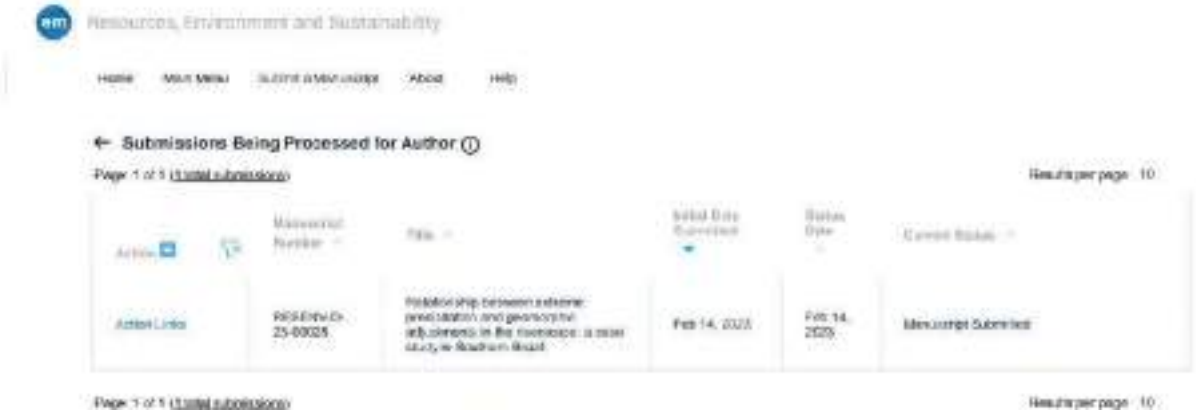
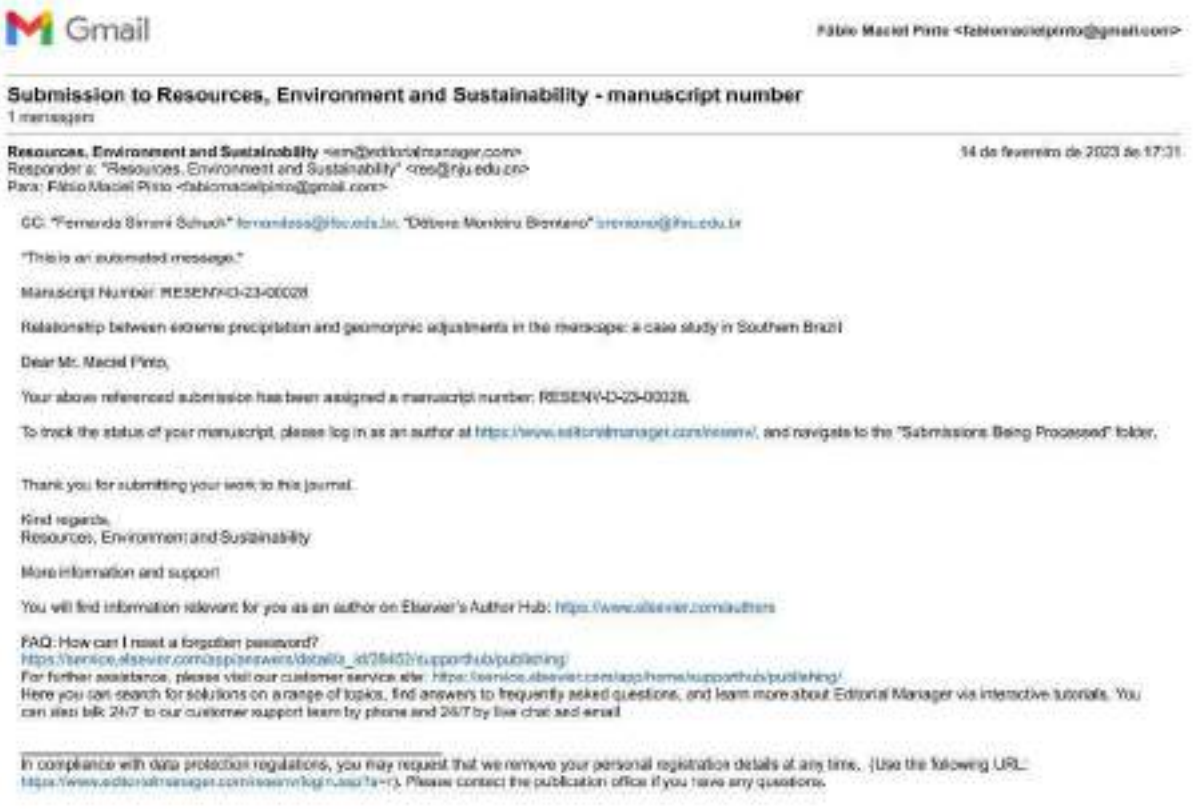


Figura 23 – Espelho do e-mail de confirmação da submissão à revista *Resources, Environment and Sustainability*.



RELAÇÕES ENTRE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E AJUSTES GEOMÓRFICOS NA PAISAGEM DO RIO ITAPOCU, REGIÃO NORDESTE DE SANTA CATARINA

RELATIONSHIP BETWEEN EXTREME PRECIPITATION AND GEOMORPHIC ADJUSTMENTS IN THE ITAPOCU RIVERSCAPE, NORTHEAST REGION OF SANTA CATARINA STATE

RESUMO

Eventos extremos de precipitação têm a capacidade de provocar ajustes geomórficos relevantes nas paisagens dos sistemas fluviais. Cenários de mudanças climáticas com aumento na severidade e na frequência desses eventos, podem acarretar em rios mais sensíveis aos processos de esculpimento da paisagem. Em consequência, as comunidades instaladas nos vales fluviais, poderão ser negativamente afetadas com o agravamento de problemas socioambientais decorrentes da ocupação desses locais. Este trabalho investiga a relação entre eventos classificados como Chuva Intensa e Chuva Persistente e ajustes na paisagem fluvial. Para isso, um trecho do rio Itapocu, situado na região Sul do Brasil entre as latitudes 26º25'S e 26º32'S foi utilizado como caso de estudo. Inicialmente, houve a caracterização dos eventos, ocorridos entre 30/01/2019 e 15/04/2019; 15/11/2020 e 30/12/2020; 23/02/2021 e 10/03/2021, registrados em séries históricas de pluviômetros alocados na circunvizinhança da área de estudo. Os ajustes geomórficos foram identificados através da seleção de imagens Sentinel-2, vetorização de geoformas do vale fluvial, delineamento e correlação entre seções transversais e longitudinais ao vale. A análise da sensitividade fluvial ocorreu através da avaliação da significância dos ajustes, com a aplicação do Teste dos Postos Sinalizados de Wilcoxon. Os resultados indicam que o rio apresentou ajustes geomórficos relacionados aos eventos, identificados como Migração de Canal Fluvial, Expansão de Canal Fluvial, Estreitamento de Canal Fluvial, Expansão de Barra Fluvial Ativa e Retraimento de Barra Fluvial Ativa. Entretanto, somente os ajustes Migração de Canal Fluvial, Expansão de Canal Fluvial e Estreitamento de Canal Fluvial foram significantes. Em 2019, 82,3% do rio foi afetado significativamente pelos eventos, enquanto em 2020 e 2021, os eventos afetaram 57,6% e 64,7% do rio.

Palavras-Chave: Mudanças climáticas, Geomorfometria, Sistema fluvial, Geomorfologia de paisagem, Sensoriamento remoto, Bacia hidrográfica.

ABSTRACT

Extreme precipitation events can cause relevant geomorphic adjustments in the riverscapes. As a result of the increase in severity and frequency of these events in climate change scenarios, riverscapes may become more sensitive to the geoforms sculpting processes. Consequently, communities in the fluvial valleys may be adversely affected, worsening socio-environmental problems that arises from the occupation of these places. This work investigates the relationship between events classified as Heavy Rainfall and Persistent Rainfall, and geomorphic adjustments in the riverscape. A section of the Itapocu River in southern Brazil between latitudes 26º25'S and 26º32'S was used as a case study. Extreme events recorded in historical series of pluviometers located around the study area, occurred between 01/30/2019 and 04/15/2019; 11/15/2019 and 12/30/2019; 02/23/2021 and 03/10/2021 were selected and characterized. The geomorphic adjustments were identified through the selection of Sentinel-2 orbital imagery, fluvial valley geoforms vectorization, delineation and correlation among transverse and longitudinal sections to the valley. The analysis of fluvial sensitivity went through the adjustments' significance evaluation by the Wilcoxon Signed Rank Test. The results indicate that the river presented adjustments related to the events, identified as Channel Migration, Channel Expansion, Channel Narrowing, River Bar Expansion and River Bar Narrowing. However, only Channel Migration, Channel Expansion, and River Bar Narrowing were significant. In 2019, 82.3% of the river was significantly affected by the events, while in 2020 and 2021 events impacted 57.6% and 64.7% of the river.

Keywords: Climate changes, Geomorphometry, Fluvial system, Landscape geomorphology, Remote sensing, Catchment.

4.1 INTRODUÇÃO

As paisagens estão sujeitas a modificações geomorfológicas resultantes da ação de fenômenos naturais que, de forma espacial complexa e transiente, afetam as suas geoformas constituintes e provocam a migração de um estado inicial de

equilíbrio morfológico relativo para uma situação com novos parâmetros de estabilidade (BRUNSDEN; THORNES, 1979).

O conceito geomorfológico de sensitividade expressa a relação entre controles naturais que imputam resistência e resiliência às geoformas da paisagem e a distribuição espaço–temporal de eventos capazes de ocasionar distúrbios reconhecíveis nessas geoformas, assim a sensitividade analisa as paisagens a partir dos limiares de estabilidade e fatores de modificação geomórfica (BRUNSDEN; THORNES, 1979; SCHUMM, 1979; FRYIRS, 2017). Em uma visão sistêmica e integrada, a sensitividade denota a paisagem como o resultado dinâmico, contínuo e em intensidades variáveis dos agentes de esculpimento e controle do relevo no tempo e espaço geográfico.

Ambientes fluviais são especialmente sensíveis a distúrbios, sujeitando–se a ajustes através de alterações no regime de escoamento superficial, o qual controla processos de migração lateral, incisão, agradação e degradação sedimentar nos rios (SCHUMM, 1979, 1993; HOLBROOK; SCHUMM, 1999; CROSBY; WHIPPLE, 2006). Esses desequilíbrios são oscilações momentâneas ou a alterações ambientais permanentes que afetam os processos de esculpimento da paisagem. Destaca-se a precipitação atmosférica como principal fonte de água para o escoamento superficial e importante agente de modelagem do relevo (SCHEIDEGGER, 1973; DEAL et al., 2018). Entretanto, essa influência varia de acordo com as características gerais da unidade climática e do regime de chuvas, sendo que a precipitação bem distribuída produz constância no fluxo hídrico e no transporte sedimentar, com domínio da modelagem lenta, enquanto nas chuvas intensas e persistentes são gerados fluxos de alta energia, responsáveis por desequilibrar rapidamente a paisagem através da ampliação da capacidade erosiva dos rios (SCHEIDEGGER, 1973; VANDENBERGHE, 2003; BASSO et al., 2015; DEAL et al., 2018). Portanto, as principais causas de modificação correspondem a eventos ambientais extremos transientes, associados às variações nas condições do tempo meteorológico e frequentemente sazonais.

Em sentido prático a sensitividade fluvial avalia o potencial de ajuste de um rio através dos fenômenos capazes de desestabilizar rapidamente e significativamente a paisagem, possibilitando a cartografia dos locais favoráveis às modificações e possibilitando ações contra impactos decorrentes, os quais correspondem a danos na tessitura dos ambientes social e natural, derivados da ocupação antrópica das

áreas sensíveis (FRYIRS, 2017; KLEINA; SANTOS, 2017; PINTO, 2020; PINTO; WEBER, 2021). A avaliação torna-se mais importante tendo em vista que os rios são altamente sensíveis a mudanças climáticas, mas variavelmente afetados de acordo com as características fisiográficas e o contexto climático (PRUDHOMME et al. 2013a, 2013b).

Projeções concernentes às mudanças climáticas indicam que o aumento da temperatura média global é acompanhado por uma intensificação dos processos ligados ao ciclo da água, incluindo a maior variabilidade sazonal e interanual na precipitação e escoamento superficial, sendo que no Sudeste da América do Sul, onde se enquadra a região Sul do Brasil, entre as décadas de 1950 e de 2020, o aumento progressivo da temperatura contribuiu para um incremento na quantidade de eventos extremos de precipitação (IPCC, 2021). Um aspecto dessa variabilidade é que os impactos sobre a intensidade dos eventos são menos significativos, sendo que as principais consequências, na região, estão associadas ao aumento na frequência dos eventos extremos (GRIMM, 2011; NUNES; SILVA, 2013). Com incidência progressivamente maior de fenômenos capazes de modificar a paisagem, os rios se tornarão mais sensíveis e serão seguidamente ajustados a novos cenários de precipitação.

Assim, avaliar a paisagem a partir dos seus fatores de modificação, permite a elaboração de modelos geoambientais úteis para a gestão territorial, ambiental e de riscos naturais (SILVA; SILVA, 2016; FRYIRS, 2017). Portanto, este estudo apresenta as bases metodológicas e os resultados das análises dos efeitos de eventos extremos de precipitação na paisagem. Desse modo, objetivou-se a identificação dos ajustes geomórficos produzidos por eventos extremos, através da integração de dados de estações pluviométricas automáticas, para a caracterização dos eventos, e dados morfométricos multitemporais associados à paisagem fluvial, extraídos de imagens orbitais com a finalidade de identificar ajustes geomórficos produzidos pelos eventos.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia objetivou a correlação de ajustes geomórficos com eventos pluviométricos extremos, temporalmente concomitantes, ocorridos nos anos de 2019, 2020 e 2021. Procedimentos estatísticos foram realizados no software PAST 4.11 (HAMMER et al. 2001). Para a extração de dados do produto MERGE

(ROZANTE et al. 2010), foi utilizado o software GrADS, já para a vetorização e a morfometria das geoformas associadas à área de estudo, foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas QGIS 3.20.

4.2.1 Área de Estudo

A área abrange uma parcela do rio Itapocu, no Estado de Santa Catarina, entre os Municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim e Araquari (Figura 24), entre as coordenadas 26°25' S / 49°14' W e 26°32' S / 48°52' W.

Figura 24 – Croqui de localização sobre composição RGB de cenas Sentinel-2 datadas de 23/02/2021.

A área enquadra-se na bacia hidrográfica homônima, situada no Estado de Santa Catarina, na região Sul do Brasil e ao Sudeste da América do Sul. Especificamente, o trecho corresponde a um segmento longitudinal do rio com cerca de 52 km, limitado na montante pela confluência dos rios Novo e Humboldt (Corupá) e na jusante pela desembocadura do canal retificado do rio Putanga (Guaramirim).

A região apresenta histórico de desastres naturais associados a eventos

extremos de precipitação, preferencialmente incidentes no verão austral (NUNES; SILVA, 2013; CARDOSO, QUADRO; BONETTI, 2020). Nessa estação a precipitação mensal atinge máximo de 470 mm e descarga fluvial de 188,5 $m^3 s^{-1}$, enquanto no inverno a precipitação mensal atinge mínimo de 140 mm e descarga de 101,2 $m^3 s^{-1}$, já a precipitação anual é de 3.000 mm e a descarga é de 1.620 $m^3 s^{-1}$ (COAN; BACK; BONETTI, 2014; OLIVEIRA et al. 2018).

4.2.2 Análise Preliminar e Seleção de Eventos Pluviométrico e de Imagens Orbitais

Para a avaliação da sensitividade do ambiente fluvial a extremos pluviais, inicialmente foram selecionados três extremos de precipitação ocorridos nos dias 18/02/2019, 27/11/2020 e 27/02/2021. A seleção ocorreu através de análise preliminar das frequências acumuladas diárias de precipitação, obtidas de dados do pluviômetro automático 420650403A – Bananal, operado pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e alocado no Município de Guaramirim. Os dados abrangem o período ou série histórica entre 01/01/2016 e 30/06/2022.

O critério de identificação de Chuva Intensa (CI) de Cardoso, Quadro e Bonetti (2020) foi aplicado às frequências acumuladas diárias da série de dados da estação para a seleção inicial desses eventos. O critério estabelece que a CI ocorre quando o valor de precipitação diária for maior ou igual ao valor do percentil 99, conforme a Eq. (2), adaptada:

$$CI = P_d \geq q_n(0.99P_d) \quad (2)$$

Onde P_d é a precipitação registrada no pluviômetro e $q_n(0.99P_d)$ é o percentil 99 da série histórica do pluviômetro.

A seguir foram elencadas as datas enquadradas no critério, da maior para a menor precipitação. A definição dos dias 18/02/2019, 27/11/2020 e 27/02/2021, com chuvas registradas de 112,2 mm, 104,8 mm e 101,0 mm, ocorreu considerando a disponibilidade de imagens orbitais ESA (*European Space Agency*), Sentinel-2/MSI para datas antes e após os eventos pluviométricos. As imagens foram selecionadas de acordo com o menor lapso temporal entre os eventos e os dias das coberturas

pelos satélites, além da constatação de que as imagens apresentavam condições atmosféricas propícias para procedimentos de vetorização e fotointerpretação de geoformas, ou seja, não apresentavam cobertura de nuvens sobre a área de estudo (Tabela 3).

Tabela 3 – Detalhamento das imagens orbitais selecionadas.

Evento	Satélites	Cenas	Data das Cenas	Resolução Espacial	Origem
18/02/2019	Sentinel-2[1] / MSI[2]	L1C_T22JFR_A009931_20190130T132233 L1C_T22JGR_A009931_20190130T132233 L1C_T22JFR_A019912_20190415T132235 L1C_T22JGR_A019912_20190415T132235	30/01/2019 – 15/04/2019	10, 20 e 60 m	ESA[3] / USGS[4]
27/11/2020	Sentinel-2[1] / MSI[2]	L1C_T22JFR_A028206_20201115T132236 L1C_T22JGR_A028206_20201115T132236 L1C_T22JFR_A019941_20201230T132524 L1C_T22JGR_A019941_20201230T132524	15/11/2020 – 30/12/2020	10, 20 e 60 m	ESA[3] / USGS[4]
27/02/2021	Sentinel-2[1] / MSI[2]	L1C_T22JGR_A029636_20210223T132233 L1C_T22JFR_A029636_20210223T132233 L1C_T22JGR_A020942_20210310T132232 L1C_T22JFR_A020942_20210310T132232	23/02/2021 – 10/03/2021	10, 20 e 60 m	ESA[3] / USGS[4]

[1]Satélites 2A e 2B, produtos Level1C. [2]*MultiSpectral Instrument*. [3]*European Space Agency*. [4]Imagens extraídas do portal earthexplorer.usgs.gov, mantido pelo *United States Geological Survey* (USGS).

4.2.3 Caracterização e Espacialização dos Eventos Pluviométricos

Para a caracterização dos eventos de precipitação, foram utilizados dados de estações pluviométricas operadas pelo CEMADEN próximas à área de estudo e dados de precipitação do produto MERGE de Rozante et al. (2010).

Os dados oriundos do produto MERGE, consistem em uma combinação de precipitação diretamente observada em estações pluviométricas com estimativas de precipitação obtidas via sensor remoto (satélite).

Além da estação 420650403A – Bananal, foram utilizados dados dos pluviômetros 420450903A, 420890601A, 420890603A, 420890606A, 420890607A, 420130701A e 421060501A (Tabela 4, Figura 25), abrangendo séries históricas entre 01/01/2016 e 30/06/2022.

Frequências acumuladas diárias foram obtidos a partir dos dados dos pluviômetros. A seguir, aplicou-se o critério de identificação de Chuva Intensa (CI), conforme a Eq. (2), para a identificação desse tipo de evento extremo de precipitação.

Tabela 4 – Identificação das estações pluviométricas utilizadas no estudo.

Município	Código	Nome	UTM[1]	Série Histórica	Origem
Corupá	420450903A	João Tozini	676.658 E / 7.074.525 S	01/01/2016 – 30/06/2022	CEMADEN[2]
Jaraguá do Sul	420890603A	Bombeiro Nereu Ramos	682.782 E / 7.072.592 S	01/01/2016 – 30/06/2022	CEMADEN[2]
Jaraguá do Sul	420890607A	SAMAE Água Verde	688.979 E / 7.070.132 S	01/01/2016 – 30/06/2022	CEMADEN[2]
Jaraguá do Sul	420890601A	Bombeiro Centro	691.244 E / 7.069.699 S	01/01/2016 – 30/06/2022	CEMADEN[2]
Jaraguá do Sul	420890606A	SAMAE Ilha da Figueira	694.837 E / 7.069.152 S	01/01/2016 – 30/06/2022	CEMADEN[2]
Guaramirim	420650403A	Bananal	703.443 E / 7.070.342 S	01/01/2016 – 30/06/2022	CEMADEN[2]
Araquari	420130701A	Rainha	727.871 E / 7.065.097 S	01/01/2016 – 30/06/2022	CEMADEN[2]
Massaranduba	421060501A	Massarandubinha	709.623 E / 7.055.250 S	01/01/2016 – 30/06/2022	CEMADEN[2]

[1]Coordenadas Cartesianas, Sistema Universal Transverso de Mercator.
[2]Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais.

Figura 25 – Localização das estações 420650403A, 420450903A, 420890601A, 420890603A, 420890606A, 420890607A, 420130701A e 421060501A em relação à área de estudo.

A seguir, foram identificados os eventos extremos classificados como Chuva Persistente (CP), conforme critério de Cardoso, Quadro e Bonetti (2020). Em sentido semelhante à CI, o critério de CP foi aplicado às frequências acumuladas. A CP ocorre quando o valor de precipitação é maior do que 1 mm em três dias consecutivos e a média móvel de três dias (MM3) enquadra-se no percentil 99, conforme a Eq. (3), adaptada dos autores supracitados:

$$CP=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{i=3} P_{d\,i-n-1} \geq q_n\ 0.99P_d \quad (3)$$

Onde P_d é a precipitação registrada no pluviômetro e $q_n(0.99P_d)$ é o percentil 99 da série histórica do pluviômetro.

A caracterização e a espacialização dos eventos foi baseada nos recortes temporais representados pelas imagens Sentinel-2 (Tabela 3). Para a espacialização dos eventos em relação à área de estudo, aplicou-se a krigagem ordinária (ARNON, 1990; BOSTAN et al., 2012; CHARLES et al., 2022) às frequências acumuladas diárias. Além disso, para a espacialização em relação à bacia hidrográfica, foram utilizados dados de precipitação do produto MERGE, TR 30 min e SR 0,1° (ROZANTE et al., 2010), aproximadamente 11,1 km.

4.2.4 Procedimentos Morfométricos de Identificação de Ajustes Geomórficos

A identificação dos ajustes geomórficos ocorridos no rio Itapocu, partiu de procedimentos iniciais de vetorização das geoformas associadas ao rio. A vetorização consiste na conversão de feições do terreno, identificadas através da fotoanálise de imagens orbitais, em objetos geométricos ou dados geoespaciais manipuláveis. A conversão ocorre através da fotoanálise das feições para a distinção de elementos texturais, seguida de fotointerpretação ou atribuição de significado a esses elementos (SOARES; FIORI, 1976).

Objetivou-se a vetorização de geoformas da paisagem fluvial correspondentes ao canal fluvial ativo, às barras fluviais ativas e aos limites do vale fluvial, os quais restringem a evolução lateral do canal. Esses limites considerados como o contato entre os sedimentos fluviais depositados no fundo do vale e as encostas rochosas adjacentes ou os sedimentos colúvio-aluvionares relacionados aos processos morfodinâmicos das encostas (WHEATON et al., 2015). Desse modo, a vetorização visou a delimitação das geoformas, ou seja, a subdivisão do terreno em unidades geomorfológicas para a análise da evolução espaço-temporal da paisagem.

Para a extração dos dados geoespaciais, as bandas espectrais B3 e B8 de resolução espacial 10 m, oriundas do satélite Sentinel-2/MSI e datadas de 30/01/2019, 15/04/2019, 15/11/2020, 30/12/2020, 23/02/2021 e do dia 10/03/2021, foram reprojetadas do *datum* WGS84 para SIRGAS2000 e realçadas através do

índice da diferença normalizada da água (NDWI) de McFeeters (1996), conforme a Eq. (4):

$$NDWI = \frac{B3\ GREEN - B8\ NIR}{B3\ GREEN + B8\ NIR} \quad (4)$$

Onde a banda B3 corresponde à faixa de onda verde de 0,52 a 0,59 µm e a B8 ao infravermelho próximo de 0,77 a 0,89 µm.

A seguir, houve a segmentação do vale fluvial em zonas morfológicas de elementos do relevo fluvial com padrões paisagísticos homólogos ou homogêneos, correspondentes a segmentos da paisagem dotados de características de organização textural e estrutural de terreno similares (SOARES; FIORI, 1976; ARCANJO, 2011). A subdivisão levou em consideração as modificações nos padrões de direção e largura do rio e do vale fluvial decorrentes de anomalias de paisagem.

O reconhecimento dos ajustes geomórficos baseou-se na morfometria dos dados geoespaciais, ou seja, na mensuração e correlação das unidades da paisagem para a identificação de modificações. Entretanto, levando em conta que a resolução espacial é fator limitante que reduz a acurácia posicional das geoformas vetorizadas e por conseguinte, a exatidão das mensurações e cálculos envolvidos nos procedimentos morfométricos, estabeleceu-se uma tolerância de 10 m para a seleção de resultados e identificação de ajustes.

Desse modo, as geoformas foram comparadas através de relações temporais entre uma data A, mais antiga e uma data B, mais recente, com estabelecimento das relações temporais (A–B): primeira relação de 30/01/2019 a 15/04/2019, segunda de 15/11/2020 a 30/12/2020 e terceira de 23/02/2021 a 10/03/2021. Após, procedeu-se com o:

a. Delineamento da seção longitudinal (SL) do canal para os anos A e B das relações, ou seja, da linha que secciona o rio da montante para a jusante na distância média entre as margens;
b. Delineamento de seções transversais (ST) ao vale fluvial e à SL do ano A, posicionadas em intervalos de 100 m e mensuradas através da função de geometria "$length" da Calculadora de Campo do software QGIS, para aplicação na Eq. (5), para identificação de ajustes (AJ) de expansão (≥10 m)

ou estreitamento (≤–10 m) do vale fluvial;

c. Medição nas ST das distâncias entre as SL dos anos A e B para identificação de migração de canal, com cálculo realizado através da função "$length";

d. Mensuração nas ST das distâncias entre as margens nos anos das relações, através da função "$length" e aplicação na Eq. (5), para identificação de ajustes (AJ) de expansão (≥10 m) ou estreitamento de canal (≤–10 m);

e. Determinação nas ST da largura das barras fluviais ativas com a função "$length" e aplicação na Eq. (5), para identificação de ajustes (AJ) expansão (≥10 m) ou retraimento de barra (≤–10 m):

$$AJ = STB\,0+000 - STA\,0+000 \quad (5)$$

Onde *AJ* é o ajuste de expansão, estreitamento ou retraimento; *ST B0+000* e *ST A0+000* são as medidas obtidas nas seções dos anos B e A da relação.

f. Fotointerpretação para nomenclatura dos ajustes identificados, conforme Brierley e Fryirs (2005); Fryirs, Spink e Brierley (2009) em Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf), Estreitamento de Canal Fluvial (SCf), Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf), Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf), Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação (IBf), Rotação de Curva Fluvial (RCv), Translação de Curva Fluvial (TCv) e Deslocamento Lateral da Curva Fluvial (DCv).

Resultados da mensuração da distância entre SL (item c), estão associados a migrações do canal no fundo do vale, sendo que os resultados apresentam sinal positivo, pois correspondem a medições diretas da reta representada pela ST entre um ponto inicial (SL de A) e um ponto final (SL de B). Já os valores resultantes da aplicação da Eq. (5) (itens b, d; e), quando positivos denotam a expansão em largura do vale, canal ou barra, e os resultados de sinal negativo indicam o estreitamento do vale, canal ou a retração em largura da barra.

4.2.5 Análise da Significância dos Ajustes Geomórficos

A análise da significância estatística objetivou a avaliação das discrepâncias entre os conjuntos de dados representados por mensurações de seções transversais

(ST), subdivididos em zonas homólogas que denotam os diferentes padrões texturais e estruturais da paisagem fluvial. Nesse sentido, para a Relação Temporal 30/01/2019 a 15/04/2019, foram delineadas 524 ST, para a relação Temporal 15/11/2020 a 30/12/2020 e para a relação Temporal 23/02/2021 a 10/03/2021, foram delineadas respectivamente 526 ST ao vale fluvial.

Considera-se que as discrepâncias representam anomalias com significado para a avaliação da sensitividade fluvial. Ou seja, podem representar tanto a tendência generalizada da paisagem às modificações geomórficas, conferindo-lhe um caráter sensível, como a resistência ou estabilidade que implica em mudanças pontuais ou insignificantes no ambiente fluvial, conferindo-lhe um caráter insensível ou de relativa estabilidade.

Na análise considerou-se que cada observação efetuada na data A, mais antiga é pareada com uma observação na data B, mais recente, tendo em vista que os dados correspondentes às observações foram extraídos do mesmo ambiente fluvial, porém com lapso temporal. Desse modo, para a avaliação da significância dos ajustes Expansão de Canal Fluvial (ECf), Estreitamento de Canal Fluvial (SCf), Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf) e Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf), foram utilizados os resultados pareados das mensurações das ST nas relações temporais (obtidas nos itens d; e, relatados no tópico anterior). A Migração de Canal Fluvial (MCf) foi avaliada através das ST ao vale fluvial (item b), tendo em vista que os resultados do item c não proporcionam a obtenção de dois conjuntos de dados pareados comparáveis. Assim, na interseção com a SL do canal, as ST foram subdivididas em meias-seções (mST). Portanto, foram obtidos dois conjuntos de dados para cada ano das relações temporais, sendo um conjunto à esquerda e um à direita da SL no sentido de um observador que se desloca da montante para a jusante. Semelhantemente ao item c, as mST denotam as movimentações da SL e do canal fluvial no fundo do vale, em relação às margens deste.

Os dados associados a cada data de observação das relações temporais, foram testados quanto à normalidade através do teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965; ROYSTON, 1995; HAMMER et al. 2001). Como os dados não apresentaram normalidade, aplicou-se o teste dos postos sinalizados de Wilcoxon (WILCOXON, 1945; HAMMER et al. 2001; HAJDUKIEWICZ et al. 2016) aos dados subdivididos em zonas homólogas para o exame de discrepâncias e atribuição de significado aos segmentos da paisagem nos quais ocorreram ajustes. Nesse

sentido, foram consideradas significantes os resultados associados ao valor-*p* de 0,05 (HAJDUKIEWICZ et al. 2016).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Características dos Eventos Extremos de Precipitação

As estações apresentaram variações na distribuição espacial e nos volumes de chuvas registrados nas séries históricas (01/01/2016 a 30/06/2022). Foram observados distintos limiares de identificação de eventos extremos, associados ao percentil 99 das observações das séries (Tabela 5, Figuras 26 e 27). Estes limiares variaram de 49,6 mm na montante do vale fluvial e da área de estudos, estação 420450903A – João Tozini e 61,8 mm na jusante, na estação 420650403A – Bananal (Figura 28).

De uma forma geral, os eventos extremos analisados, associados às relações temporais, tiveram incidência entre o final da primavera e o início do outono.

No período associado à primeira relação temporal (30/01/2019 a 15/04/2019), eventos de CI ocorreram em 17/02/2019, 18/02/2019 (verão) e 07/04/2019 (outono), respectivamente com maiores picos de precipitação registrados nas estações 420130701A (134,8 mm), 420890606A (118,2 mm) e 420450903A (56,0 mm) (Tabela 6). Conforme a Tabela 6, os maiores picos de precipitação diária incidiram no verão, sendo majoritariamente superiores a 60 mm, enquanto no outono, os picos foram inferiores a 60 mm.

Os eventos de CI dos dias 17/02/2019 e 18/02/2019, ocorridos no verão e maiores do que 100 mm (registrados nas estações 420130701A, 420890606A e 420650403A), contribuíram para a elevação das médias móveis de três dias (MM3) acima dos limiares do percentil 99. Nesse sentido, houve o registro de CP entre 15/02/2019 e 19/02/2019, com acumulado observado de até 291,6 mm (Figuras 29 e 30).

Na segunda relação temporal (15/11/2020 a 30/12/2020), eventos de CI ocorreram em 27/11/2020, 05/12/2020, 06/12/2020, 12/12/2020 (primavera) e 29/12/2020 (verão), respectivamente com maiores picos registrados nas estações 420650403A (104,8 mm), 420450903A (62,4 mm), 421060501A (60,8 mm), 420450903A (75,4 mm) e 420450903A (49,6 mm) (Tabela 6). Portanto os eventos de CI concentraram-se, essencialmente, na primavera, com precipitação diária frequentemente superior a 60 mm.

Figura 26 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) das séries históricas em relação ao limiar de precipitação (mm) que representa o percentil 99. As linhas horizontais em azul indicam os máximos da precipitação diária. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99. As barras horizontais em preto, na porção inferior dos gráficos, indicam as relações temporais analisadas.

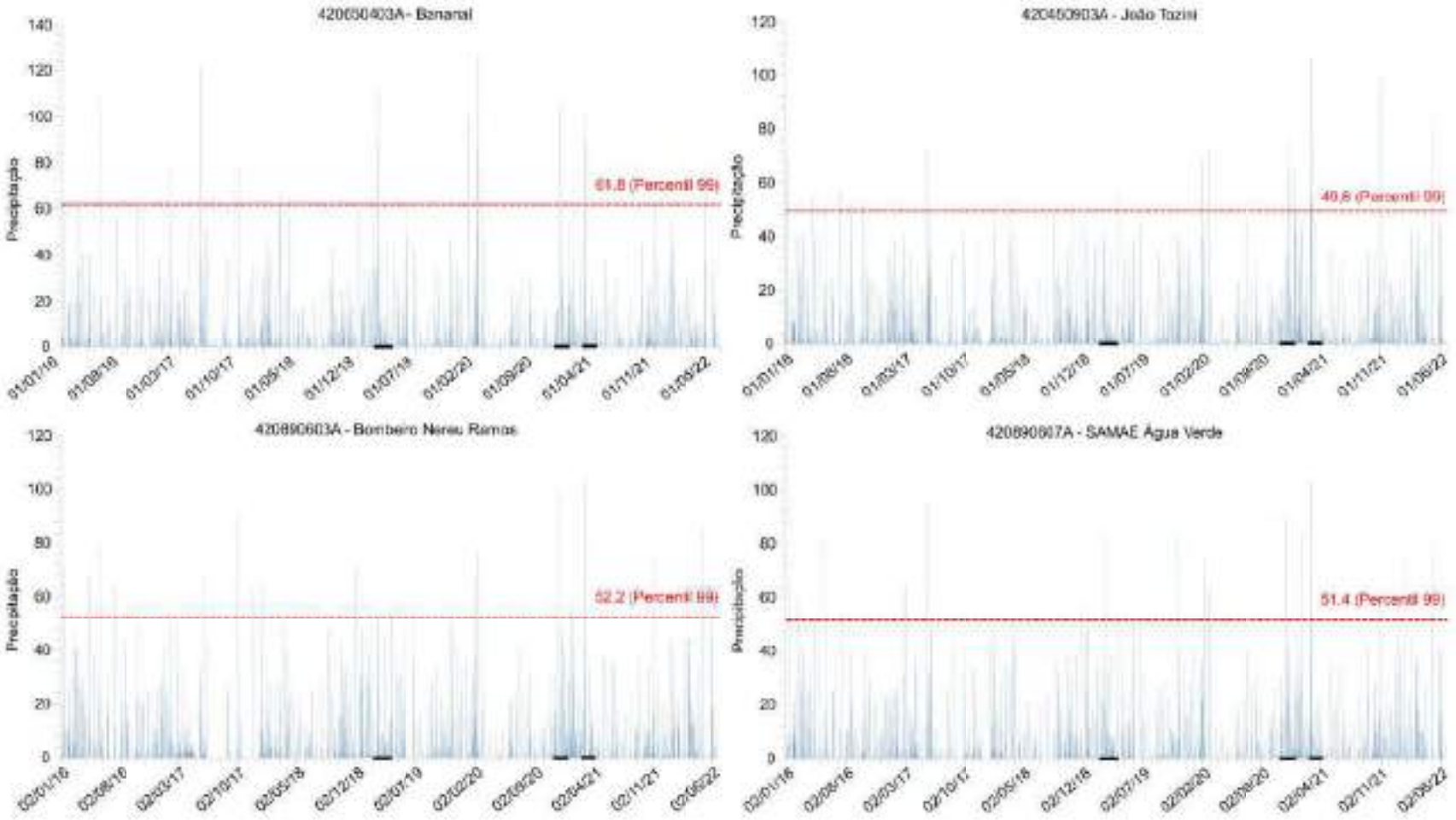


Figura 27 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) das séries históricas em relação ao limiar de precipitação (mm) que representa o percentil 99. As linhas horizontais em azul indicam os máximos da precipitação diária. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99. As barras horizontais em preto, na porção inferior dos gráficos, indicam as relações temporais analisadas.

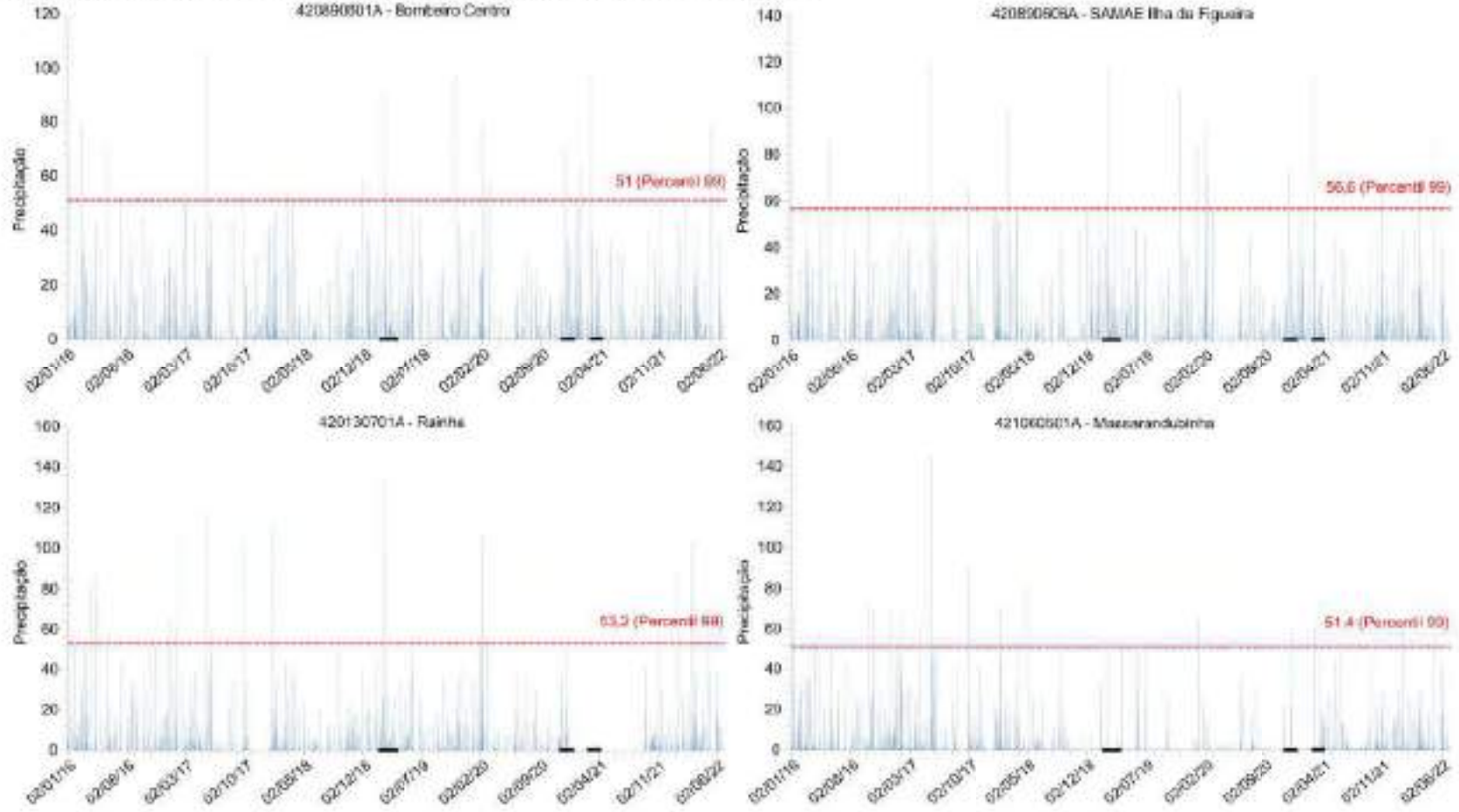
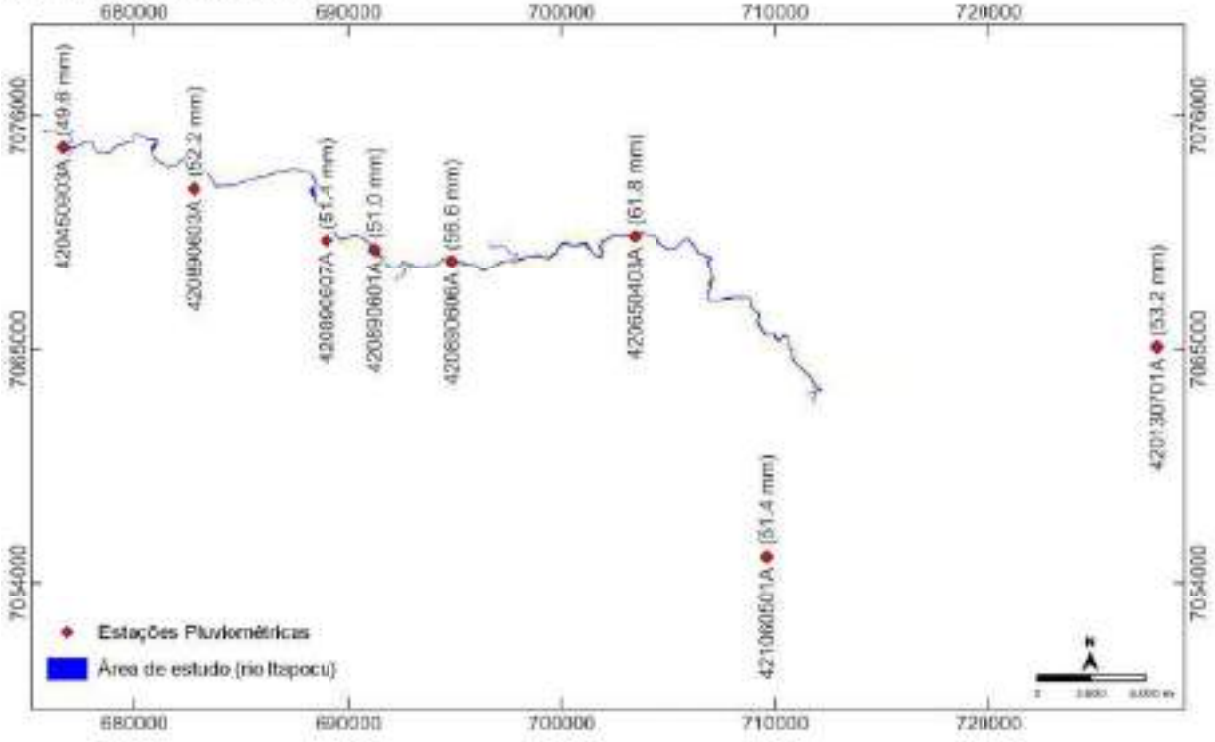


Tabela 5 – Limiares de detecção de eventos extremos das estações.

Estação ou Ponto	Município	Série Histórica	Limiar (Percentil 99)
420450903A – João Tozini	Corupá	01/2016 – 06/2022	49,6 mm
420890603A – Bombeiro Nereu Ramos	Jaraguá do Sul	01/2016 – 06/2022	52,2 mm
420890607A – SAMAE Água Verde	Jaraguá do Sul	01/2016 – 06/2022	51,4 mm
420890601A – Bombeiro Centro	Jaraguá do Sul	01/2016 – 06/2022	51 mm
420890606A – SAMAE Ilha da Figueira	Jaraguá do Sul	01/2016 – 06/2022	56,6 mm
420650403A – Bananal	Guaramirim	01/2016 – 06/2022	61,8 mm
420130701A – Rainha	Araquari	01/2016 – 06/2022	53,2 mm
421060501A – Massarandubinha	Massaranduba	01/2016 – 06/2022	51,4 mm

Figura 28 – Estações pluviométricas e relação dos percentis 99 obtidos para as séries históricas (01/01/2016 a 30/06/2022).



Entretanto, o registro de precipitação maior do que 100 mm ocorreu apenas na estação 420650403A, exclusivamente no dia 27/11/2020. Os eventos de CI não ocasionaram a elevação da MM3. Portanto, no período não foi registrada CP (Tabela 6, Figuras 31 e 32)

Na terceira relação (23/02/2021 a 10/03/2021), extremos de CI ocorreram em 27/02/2021, 28/02/2021, 01/03/2021 e 03/03/2021 (verão), com picos nas estações 420890606A (112,6 mm), 420450903A (56,0 mm), 420890603A (98,4 mm) e 420450903A (75,4 mm) (Tabela 6). A precipitação diária superior a 100 mm ocorreu no dia 27/02/2021, sendo registrada nas estações 420650403A, 420890606A,

420890607A, 420890603A e 420450903A. Os eventos de CI de 27/02/2021, 28/02/2021 e 01/03/2021 ocasionaram a elevação da MM3 e o registro de CP entre 26/02/2021 e 01/03/2021, com acumulado de 256,2 mm (Figuras 33 e 34).

Tabela 6 – Registro de eventos de Chuva Intensa (CI) e Chuva Persistente (CP).

Período	Estações	Percentil 99 (mm)	Período Chuvoso	CI	Pico de Precipitação (mm)	Período de CP	Período de CP Precipitação Acumulada (mm)
30/1/2019 – 15/4/2019	420890607A	51,4	11/0/2019 – 23/2/2019	17/2/2019	55,6	15/2/2019 – 19/2/2019	198,6
	420890601A	51,0			55,6	15/2/2019 – 19/2/2019	194,8
	420890606A	56,6			61,2	15/2/2019 – 19/2/2019	236,8
	420650403A	61,8			88,4	15/2/2019 – 19/2/2019	288,4
	420130701A	53,2			134,8	15/2/2019 – 19/2/2019	291,6
	420890607A	51,4	11/2/2019 – 23/2/2019	18/2/2019	83,8	15/2/2019 – 19/2/2019	198,6
	420890601A	51,0			91,4	15/2/2019 – 19/2/2019	194,8
	420890606A	56,6			118,2	15/2/2019 – 19/2/2019	236,8
	420650403A	61,8			112,2	15/2/2019 – 19/2/2019	288,4
	420130701A	53,2			96,2	15/2/2019 – 19/2/2019	291,6
	420450903A	49,6	4/4/2019 – 10/4/2019	7/4/2019	56,0		
	420890603A	52,2			55,0		
	420890601A	51,0			52,4		
15/11/2020 – 30/12/2020	420890603A	52,2	27/11/2020 – 30/12/2020	27/11/2020	98,0		
	420890607A	51,4			89,6		
	420890601A	51,0			69,2		
	420890606A	56,6			73,0		
	420650403A	61,8			104,8		
	420450903A	49,6		5/12/2020	62,4		
	420130701A	53,2			56,6		
	421060501A	51,4		6/12/2020	60,8		
	420450903A	49,6		12/12/2020	75,4		
	420450903A	49,6		29/12/2020	49,6		
23/2/2021 – 10/3/2021	420450903A	49,6	23/2/2021 – 6/3/2021	27/2/2021	106,4	26/2/2021 – 1/3/2021	221,6
	420890603A	52,2			106,4	26/2/2021 – 1/3/2021	256,2
	420890607A	51,4			104,0	26/2/2021 – 1/3/2021	202,4
	420890601A	51,0			97,4	26/2/2021 – 1/3/2021	177,8
	420890606A	56,6			112,6	26/2/2021 – 1/3/2021	210,8
	420650403A	61,8			101,0	26/2/2021 – 1/3/2021	226,0
	420450903A	49,6		28/2/2021	56,0	26/2/2021 – 1/3/2021	221,6
	420450903A	49,6		1/3/2021	52,0	26/2/2021 – 1/3/2021	221,6
	420890603A	52,2			98,4	26/2/2021 – 1/3/2021	256,2
	420890607A	51,4			51,0	26/2/2021 – 1/3/2021	202,4
	420650403A	61,8			87,8	26/2/2021 – 1/3/2021	226,0
	421060501A	51,4			59,8		
	420450903A	49,6		3/3/2021	75,4		

Figura 29 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 30/01/2019 e 15/04/2019. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.

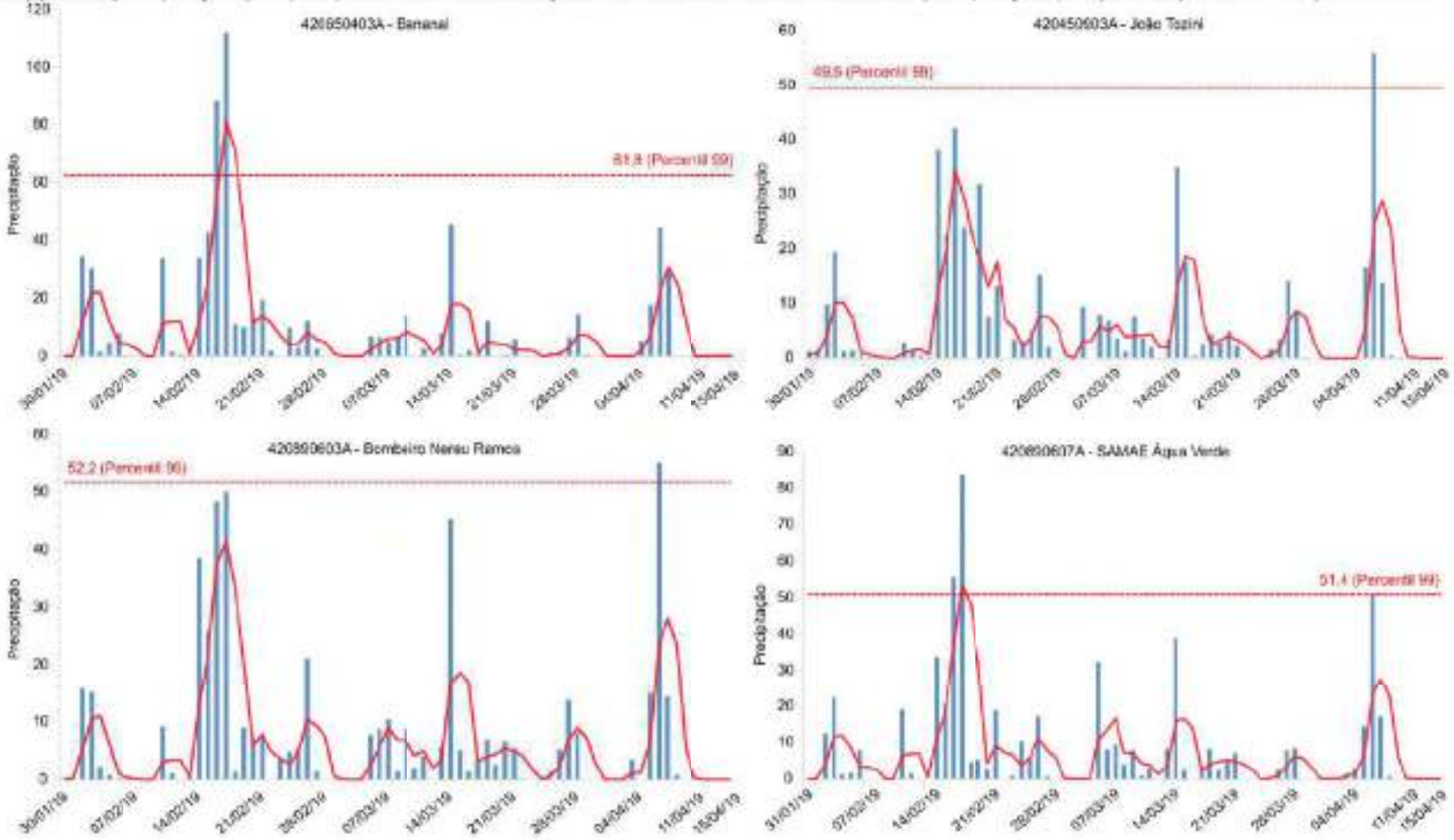


Figura 30 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 30/01/2019 e 15/04/2019. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.

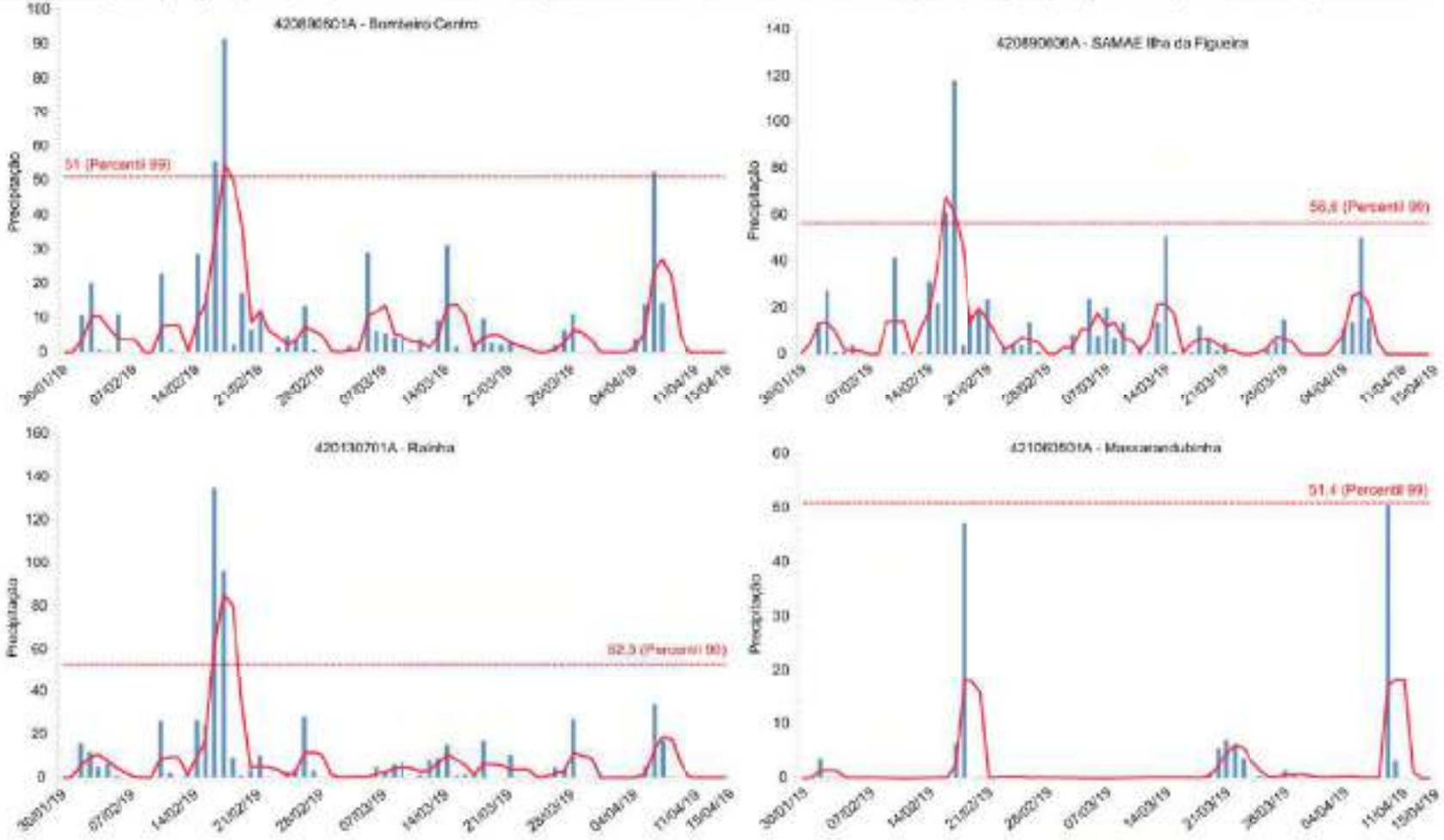


Figura 31 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 15/11/2020 a 30/12/2020. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.

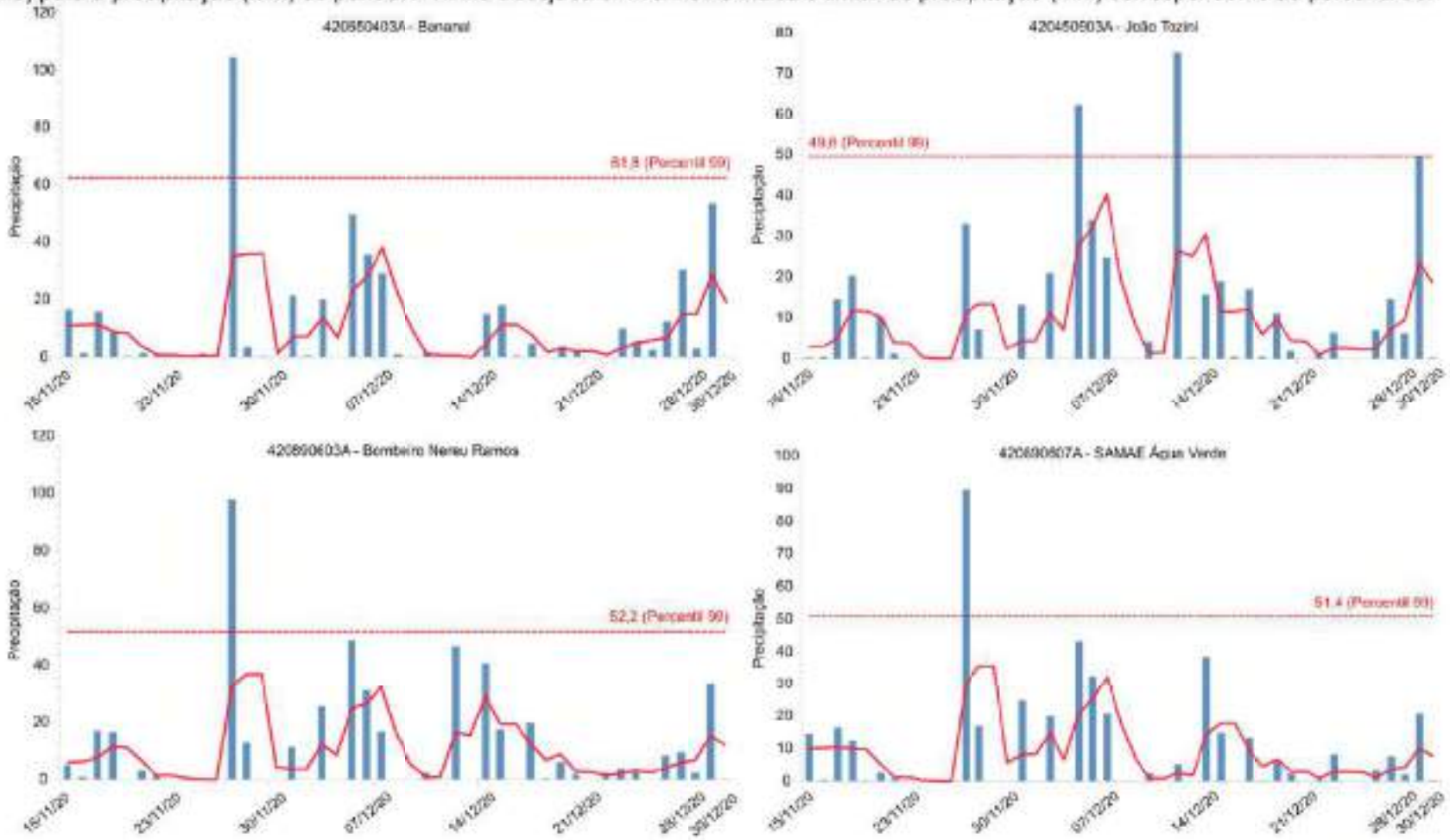


Figura 32 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 15/11/2020 a 30/12/2020. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.

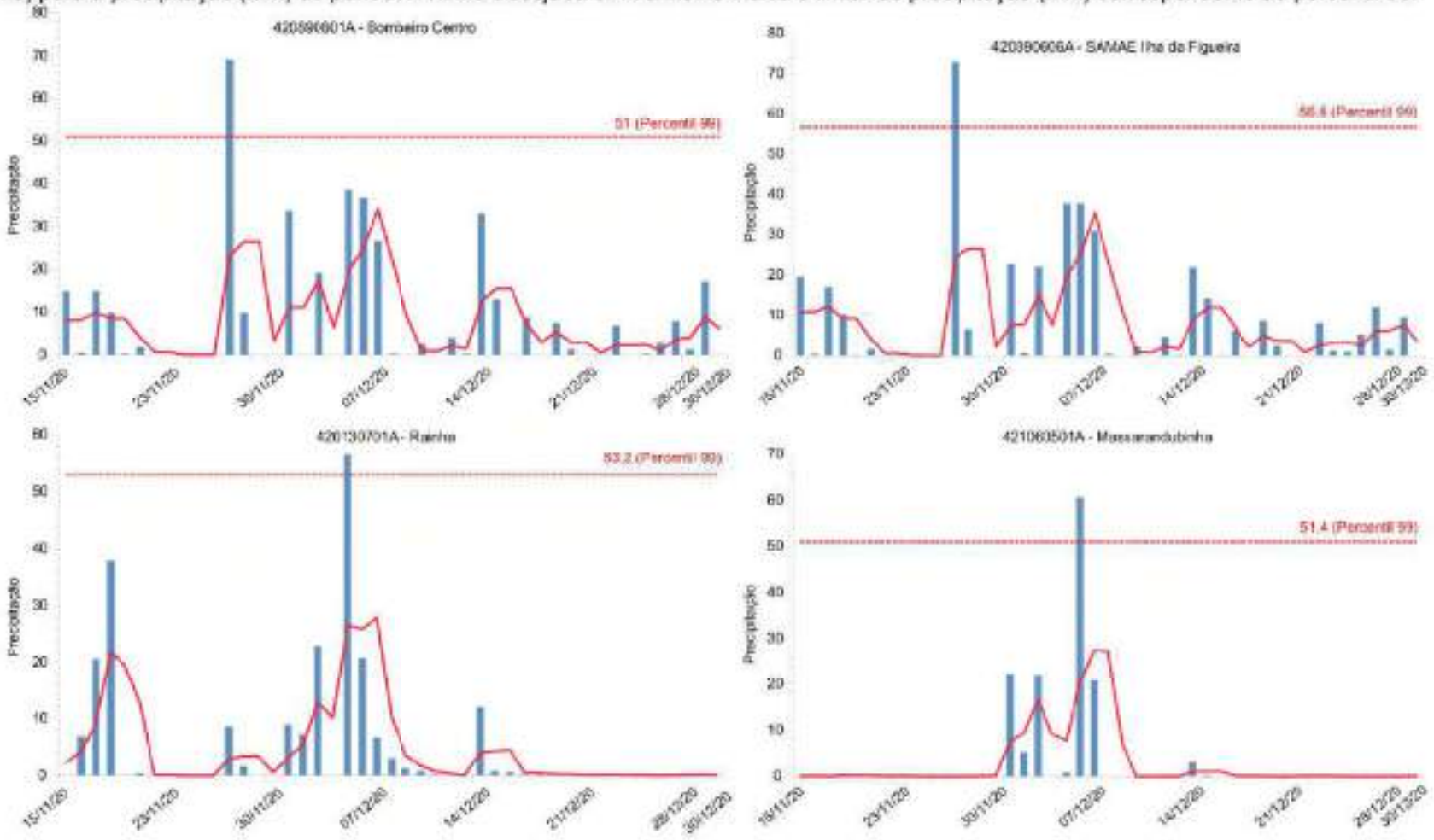


Figura 33 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 23/02/2021 a 10/03/2021. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.

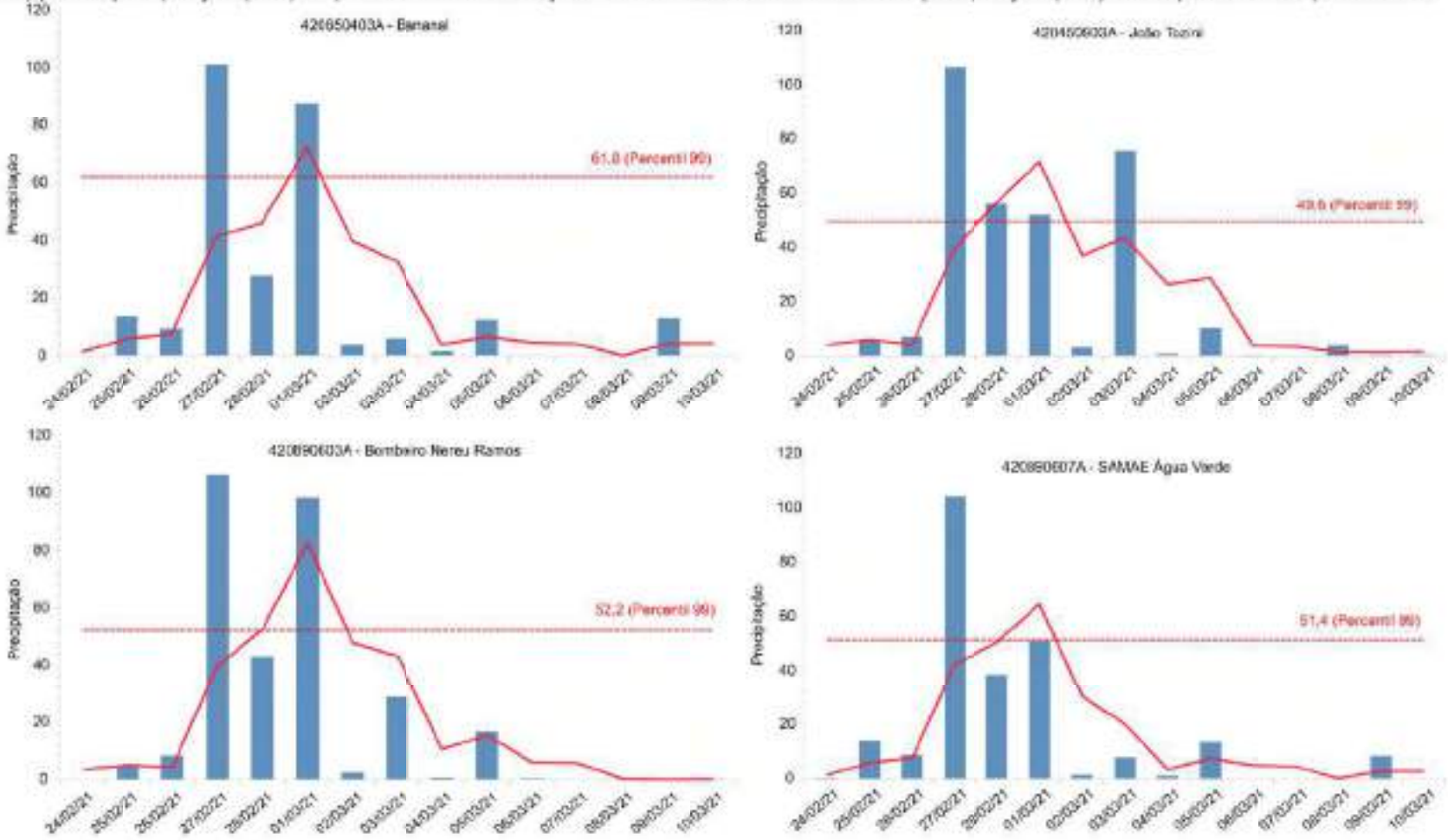
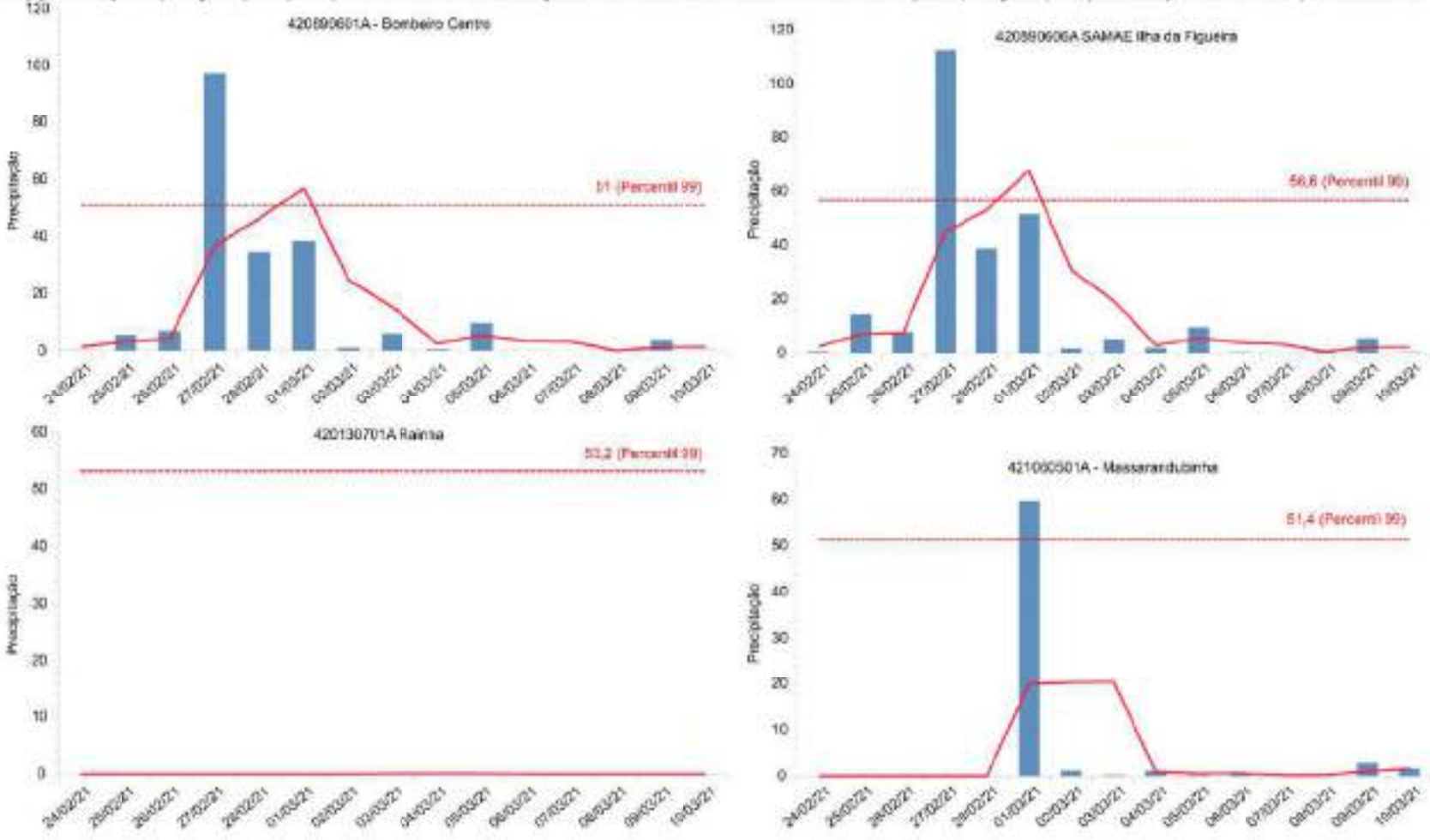


Figura 34 – Gráficos da precipitação diária acumulada (mm) para o período entre 23/02/2021 a 10/03/2021. A linha vermelha corresponde às variações das médias móveis de três dias (MM3) para a precipitação (mm) do período. A linha tracejada em vermelho indica o limiar de precipitação (mm) correspondente ao percentil 99.



Conforme extrai-se da Tabela 6, o verão concentrou a maior quantidade de dias com precipitação superior a 100 mm. Os eventos de CI dos anos de 2019 e 2021, incidentes principalmente no verão, foram responsáveis pela elevação das MM3 acima dos limiares de precipitação representados pelo percentil 99 das observações das séries históricas das estações. Essencialmente, os eventos de CI do ano de 2020 concentraram-se na primavera e não implicaram em CP. Na ocasião, apenas uma estação registrou precipitação superior a 100 mm. Denota-se um maior potencial de observação de eventos de precipitação diária superior a 100 mm no verão. Inclusive, com maior persistência temporal (mais dias de ocorrência de CI, culminando em CP), maior distribuição espacial (registro de CI em um maior número de estações pluviométricas, ou seja, maior abrangência geográfica) e maior intensidade (maiores volumes de precipitação em um único dia).

Conforme Nunes e Silva (2013), Coan, Back e Bonetti (2014), Oliveira et al. (2018) e Cardoso, Quadro e Bonetti (2020), o verão é a estação preferencial para incidência de eventos extremos de precipitação na região. Na estação, os totais mensais podem atingir até cerca de 470 mm (COAN, BACK e BONETTI, 2014).

O evento de CP de 2019 (15/02/2019 a 19/02/2019), conforme registro da estação 420130701A, culminou em um acumulado de 291,6 mm. Ou seja, 62,04% da precipitação máxima mensal estimada em 470 mm. Por outro lado, a CP (26/02/2021 a 01/03/2021) registrada na estação 420890603A, no ano de 2020, totalizou 256,2 mm ou 54,51 % da precipitação máxima estimada (Tabela 6).

4.3.2 Representatividade e Interações entre Ajustes Geomórficos

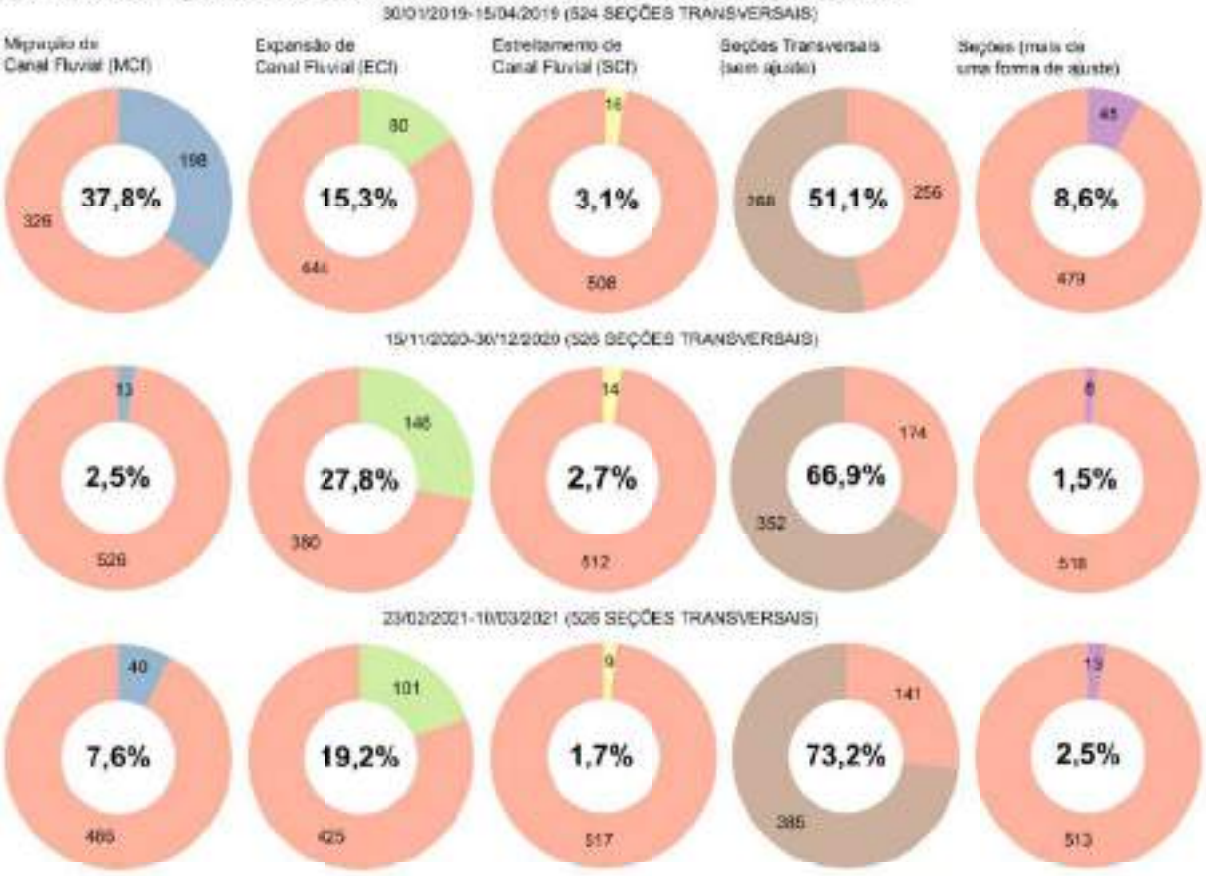
Nas relações temporais foram identificados os ajustes Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf) e Estreitamento de Canal Fluvial (SCf), relacionados a modificações na geometria e posição espacial do rio; os ajustes Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf) e Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf), associados a modificações em barras; e aquelas associadas à modificações nas formas em planta das curvas do canal, denominadas Rotação de Curva Fluvial (RCv), Translação de Curva Fluvial (TCv) e Deslocamento Lateral da Curva Fluvial (DCv).

Não foram verificados ajustes nos limites do vale fluvial, os quais permaneceram relativamente inalterados ao longo das relações temporais.

4.3.2.1 Relação Temporal 30/01/2019–15/04/2019

Para a relação, houve o delineamento de 524 ST. Nestas, predominou o ajuste MCf, constatado em 198 ST (37,8%). Ajustes ECf e SCf ocorreram em 80 (15,3%) e 16 (3,1%) dos casos, enquanto 268 ST (51,1%) não sofreram modificações. Casos de ST que apresentaram mais de uma forma de ajuste, foram 45 (8,6%) (Figura 35). Do total de 524 ST, 16 (3,1%) transeccionaram barras fluviais ativas. Nestas, a EBf e a RBf ocorreram em 1 ST (6,3% das ST às barras) e 6 (37,5%), sendo que 9 (56,3%) não sofreram modificações e 3 (18,8%) apresentam mais de uma forma de ajuste (Figura 36).

Figura 35 – Gráficos da representatividade dos ajustes de Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf), Estreitamento de Canal Fluvial (SCf), das Seções Transversais (ST) que não apresentaram ajustes e daquelas com mais de um tipo de ajuste geomórfico.



A MCf (37,8% ou 198 ST) associada ao desenvolvimento ou ao deslocamento de curva fluvial, correspondendo aos ajustes específicos RCv, DCv e TCv, ocorreu respectivamente em 68 (34,3%), 67 (33,8%) e 9 (4,5%). Por outro lado, 54 (27,3%) das ST com MCf, não estiveram associadas a ajustes em curvas fluviais (Figura 37).

Já as 45 ST (8,6% das 524 ST) com mais de uma forma de ajuste, se

distribuíram entre as associações MCf-ECf em 36 ST (80,0%), MCf-SCf em 6 (13,3%) e 3 ST (6,6%) distribuídas entre MCf-RBf, SCf-RBf e ECf-RBf (Figura 38). As associações com MCf, englobam os casos RCv, DCv e TCv.

No caso, das 16 ST em barras, 7 ST apresentaram indícios de ajustes, sendo que 3 (18,8% das 16 ST) apresentaram associações MCf-RBf, SCf-RBf e ECf-RBf, enquanto 5 (25%) não compuseram quaisquer associações (Figura 38).

Figura 36 – Distribuição das Seções Transversais (ST) que transeccionam barras fluviais. Representatividade dos ajustes Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf) e Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf). Distribuição das seções que não apresentaram ajustes em barras e daquelas com ajustes associados nas barras e no canal.

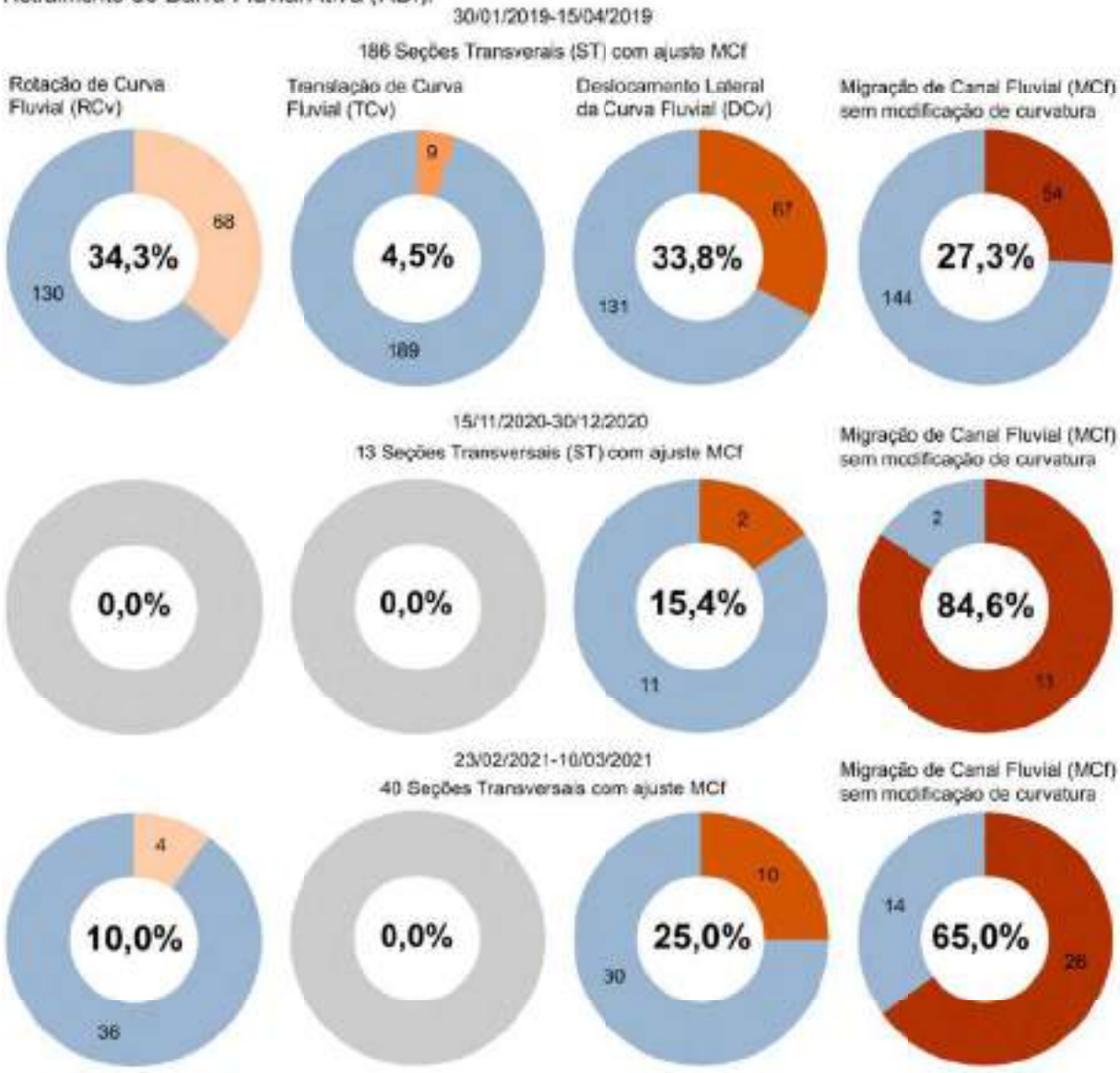
4.3.2.2 Relação Temporal 15/11/2020–30/12/2020

Na análise da relação, foram delineadas 526 ST. Houve predomínio do ajuste ECf em 146 ST (27,8%). A SCf e a MCf ocorreram em 14 (2,7%) e 13 (2,5%). Não foram constatadas modificações em 352 (66,9%), enquanto 8 (1,5%) apresentaram mais de uma forma de ajuste (Figura 35). Das 526 ST, 17 (3,2%) transeccionaram barras. Nestas, a RBf ocorreu em 8 ST (47,1% das ST às barras), a EBf em 1 (5,9%), 8 ST (47,1%) não sofreram modificações e 3 (17,6%) apresentam mais de

um ajuste (Figura 36).

A MCf (13 ST), associada ao desenvolvimento ou ao deslocamento de curva fluvial, correspondendo ao ajuste DCv, ocorreu em 2 ST (15,4% das 13 ST). Não foram constatados os ajustes RCv e TCv (Figura 37).

Figura 37 – Gráficos da representatividade dos ajustes Rotação de Curva Fluvial (RCv), Translação de Curva Fluvial (TCv), Deslocamento Lateral de Curva Fluvial (DCv), em relação ao total de Seções Transversais (ST) com ajuste Migração de Canal Fluvial (MCf). Representatividade do ajuste Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação (IBf), em relação às seções com ajuste Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf).



Já as 8 ST (1,5%) com mais de um ajuste, se distribuíram entre as associações MCf-ECf em 4 ST (50,0%) e as MCf-SCf, MCf-RBf, MCf-ECf-EBf e ECf-RBf, cada qual com 1 ST (12,5%) (Gráfico 9). No caso, das 17 ST em barras, 9 apresentaram indícios de ajustes, das quais 3 (17,6% das 17 ST) apresentaram

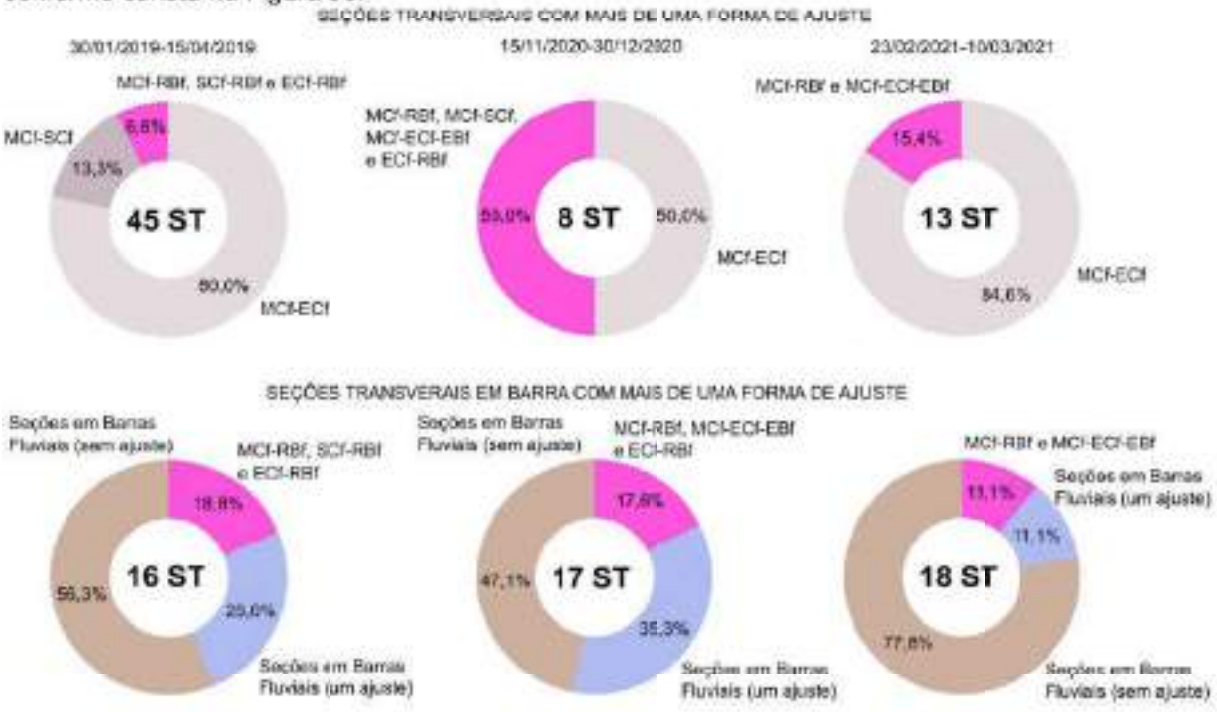
associações MCf-RBf, MCf-ECf-EBf e ECf-RBf, enquanto 6 (35,3%) não compuseram quaisquer associações (Figura 38).

4.3.2.3 Relação Temporal 23/02/2021–10/03/2021

Nas 526 ST da relação, houve ECf em 101 (19,2%), MCf em 40 (7,6%) e SCf em 9 (1,7%). Não ocorreram modificações em 141 (73,2%) e 13 (2,5%) apresentaram mais de um ajuste (Figura 35). Daquelas 526 ST, 18 (3,4%) transeccionaram barras. Destas, constatou-se RBf ocorreu em 3 (16,7% das 18 ST) e a EBf em 1 (5,6%), enquanto 14 ST (77,8%) não sofreram modificações e 2 (11,1%), apresentaram mais de um ajuste (Figura 36).

A MCf (40 ST), associada ao desenvolvimento ou ao deslocamento de curva fluvial, correspondendo aos ajustes DCv e RCv, ocorreram em 10 (25,0% das 40 ST) e 4 ST (10,0%). Não foi constatado o ajuste TCv (Figura 37).

Figura 38 – Gráficos da representatividade das principais associações entre ajustes geomórficos, considerando o total de Seções Transversais (ST) com mais de um ajuste em cada relação temporal, conforme consta na Figura 36.



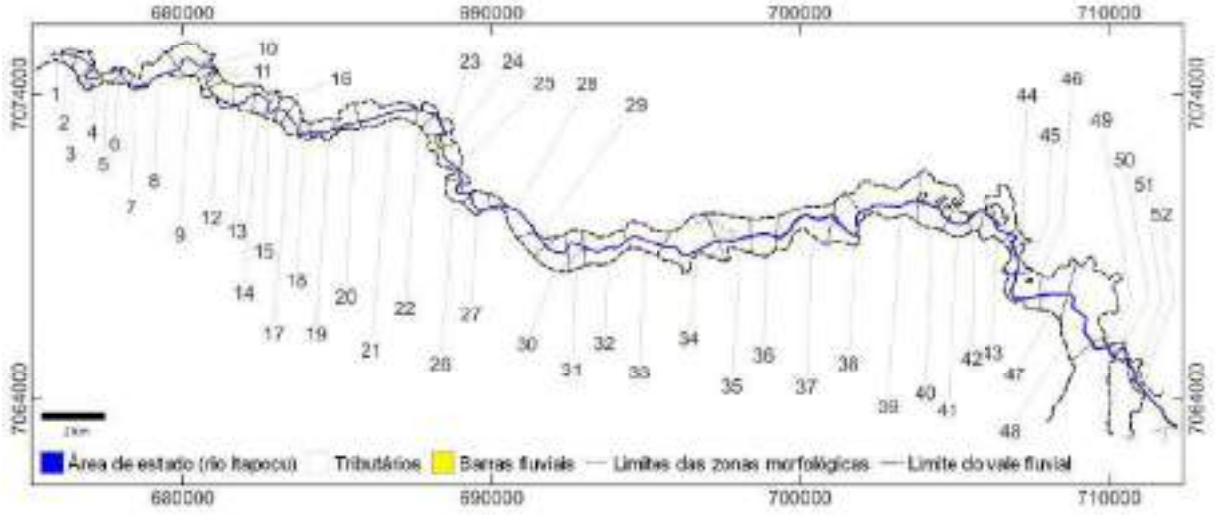
Dentre as 13 ST com mais de um ajuste, predominou a associação MCf-ECf em 11 ST (84,67%). Secundariamente, as associações MCf-ECf-EBf e MCf-RBf ocorreram, cada qual, em 1 ST (7,7%) (Figura 38). Das 18 ST em barras, 4 apresentaram indícios de ajustes. Dentre estas, 2 (11,1% das 18 ST) apresentaram

associações MCf-RBf e MCf-ECf-EBf, enquanto 2 (11,1%) não compuseram quaisquer associações (Figura 38).

4.3.3 Distribuição Espacial dos Eventos Extremos e Relações com os Ajustes Geomórficos na Paisagem Fluvial

Através dos procedimentos morfométricos o rio foi subdividido em 52 zonas morfológicas (Z1 a Z52) delimitadas por anomalias de paisagem (Figura 39).

Figura 39 – Delimitação das zonas morfológicas e do vale fluvial.



A partir de mapas de distribuição de precipitação, elaborados a partir de dados de precipitação do produto MERGE, observou-se que as chuvas ocorridas nos dias 17/02/2019, 18/02/2019, 07/04/2019, 27/11/2020, 05/12/2020, 06/12/2020, 27/02/2021, 28/02/2021, 01/03/2021 e 03/03/2021, atingiram a totalidade da bacia hidrográfica e das zonas morfológicas, porém com variações nos locais atingidos pelos extremos pluviométricos (Figuras 40 e 41). Denota-se que os dados das estações pluviométricas CEMADEN, não estão incorporados no produto MERGE.

Através da interpolação dos dados de precipitação por krigagem ordinária e obtenção de imagens raster (SR 100 m) (Figuras 42), observou-se que no período relativo à primeira relação temporal, os eventos extremos atingiram a área de estudo entre as Z7 a Z52 (17/02/2019), Z1 a Z52 (18/02/2019) e Z1 a Z28 (07/04/2019). À época, o rio apresentava cerca de 52,4 km de extensão e as zonas atingidas representavam, respectivamente, 48,8 km (93,2%), 52,4 km (100,0%) e 22,9 km (43,6%) do rio na área de estudo.

Figura 40 – Distribuição da precipitação (mm) na bacia hidrográfica do rio Itapocu nos dias de Chuva Intensa (CI) a partir de dados de precipitação MERGE.

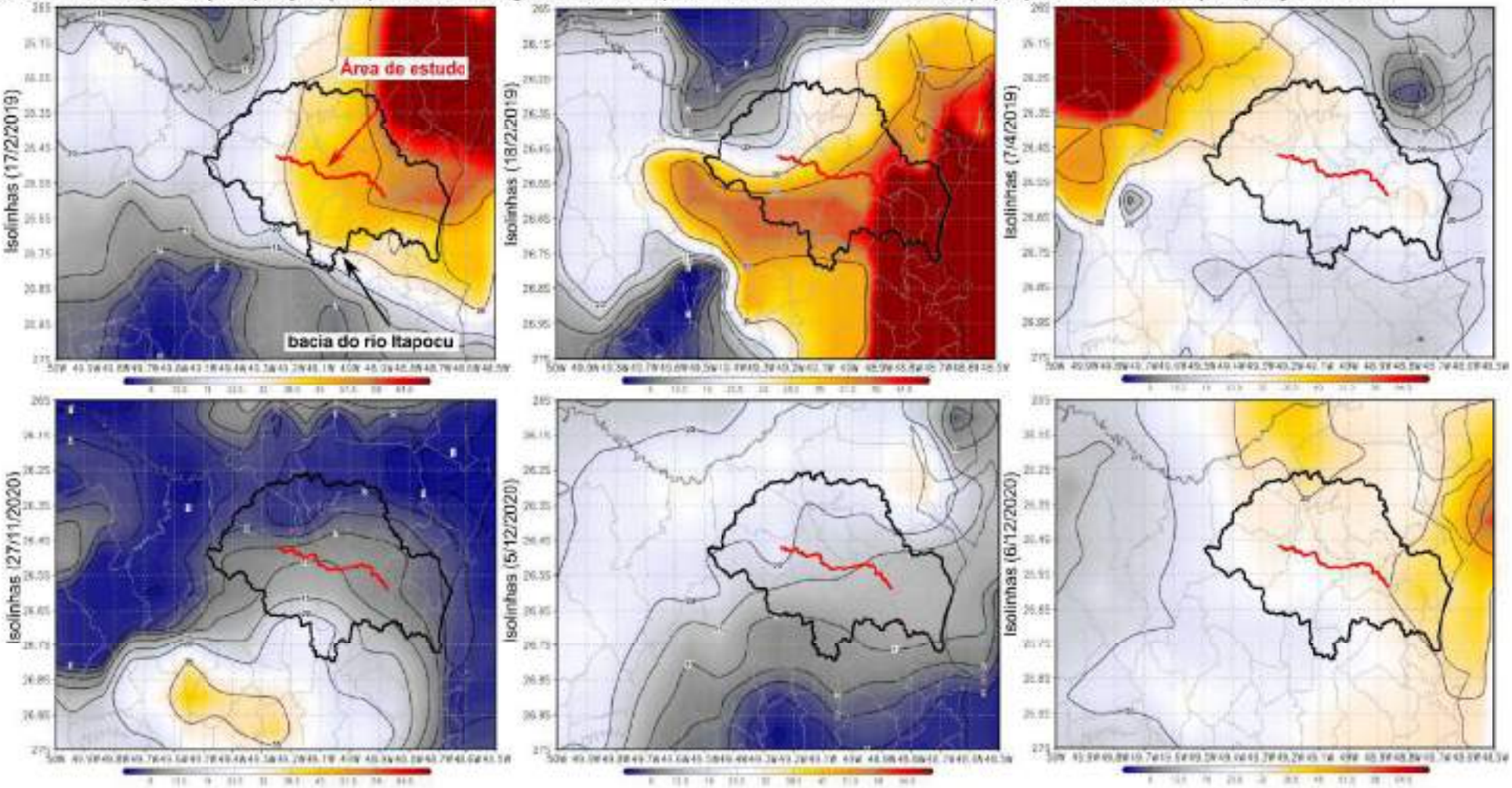


Figura 41 – Distribuição da precipitação (mm) na bacia hidrográfica do rio Itapocu nos dias de Chuva Intensa (CI) a partir de dados de precipitação MERGE.

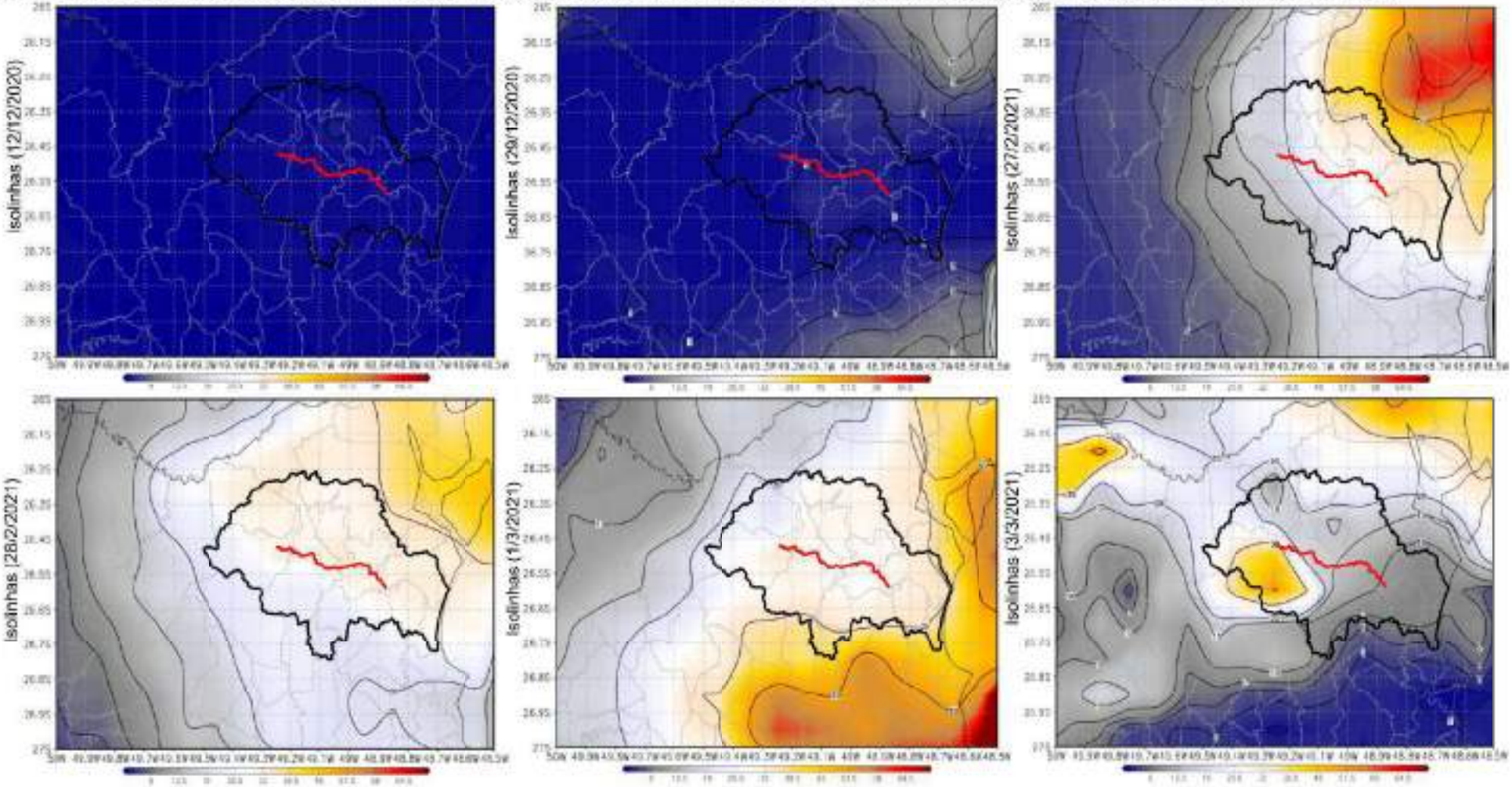
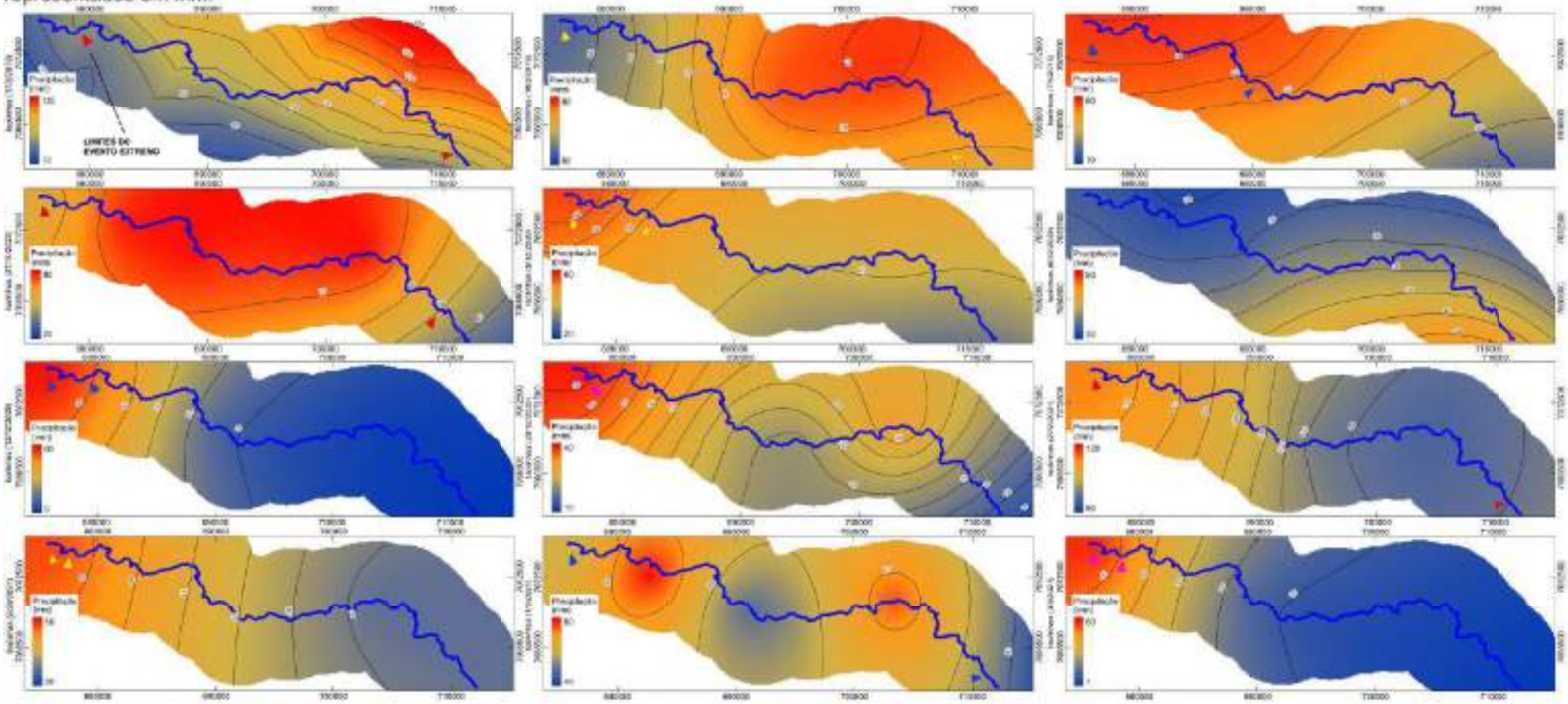


Figura 42 – Espacialização dos eventos extremos de precipitação em relação à área de estudo, a partir de krigagem ordinária. Totais de precipitação (isolinhas) representados em mm.



Quanto à segunda relação, os eventos de CI e CP atingiram as Z1 a Z49 (27/11/2020), Z1 a Z15 (05/12/2020), Z1 a Z8 (12/12/2020) e Z1 a Z4 (29/12/2020). Os eventos extremos de 06/12/2020 atingiram regiões na jusante da Z52, não afetando diretamente a área de estudo. O rio apresentava 52,6 km e o conjunto das zonas atingidas, respectivamente, 49,1 km (93.36%), 10,7 km (20,35%), 5,4 km (10,3%), e 2,4 km (4,5%).

Já na terceira relação, os eventos atingiram as Z1 a Z52 (27/02/2021), Z1 a Z5 (28/02/2021), Z1 a Z52 (01/03/2021) e Z1 a Z7 (03/03/2021). O rio apresentava 52,5 km e as zonas cerca de 52,5 km (100,0 %), 3,1 km (5,82%), 52,5 km (100,0 %) e 4,1 km (7,7%).

4.3.4 Análise da Significância dos Ajustes Geomórficos e Classificação das Zonas Morfológicas Sensíveis

A partir do teste de Shapiro-Wilk, os dados extraídos das ST apresentaram distribuições não normais (Tabela 7). Desse modo, o teste dos postos sinalizados de Wilcoxon foi aplicado aos pares de dados das relações, subdivididos em zonas morfológicas homólogas.

Às zonas que não registraram ajustes geomórficos, o teste não foi aplicado, sendo que estas foram consideradas Insensíveis aos extremos de precipitação. Às zonas com registros de ajustes, o teste foi aplicado às ST ao canal, ao vale e às barras fluviais ativas.

Tabela 7 – Valores-*p* resultantes do teste de normalidade de Shapiro-Wilk.

Conjunto de Dados	Seções Transversais ao Canal Fluvial	Seções Transversais às Barras Fluviais	Seções Transversais ao Vale Fluvial	Conclusão[1]
30/01/2019	2,765e-027	1,875e-043	2,256e-031	Hipótese Alternativa
15/04/2019	3,329e-026	1,585e-043	2,197e-031	Hipótese Alternativa
15/11/2020	8,625e-029	1,746e-043	6,485e-028	Hipótese Alternativa
30/12/2020	3,135e-026	1,61e-043	1,548e-027	Hipótese Alternativa
23/02/2021	8,004e-026	2,007e-043	1,029e-026	Hipótese Alternativa
10/03/2021	2,051e-025	1,969e-043	1,032e-026	Hipótese Alternativa

[1]Hipótese Alternativa ($p \leq 0,05$), correspondente a dados não normais. Hipótese Nula ($p > 0,05$), correspondente a dados normais.

Zonas com resultados significantes em relação ao valor-*p* (hipótese alternativa), foram consideradas Sensíveis. Ao contrário, zonas com registros de

ajustes, mas resultados insignificantes quanto ao valor-*p* (hipótese nula), foram classificadas como Estáveis. Nesse caso, as modificações identificadas não foram invalidadas, mas consideradas pontuais ou espacialmente restritas, conferindo um caráter de relativa estabilidade ao ambiente fluvial.

Através do procedimento de identificação de ajustes geomórficos, observou-se que na primeira relação não houve registro de zonas Insensíveis (Tabela 8, Figura 43A). Zonas classificadas como Estáveis totalizaram 15, correspondentes a 9,3 km ou 17,7% do rio na área de estudo; e as Sensíveis somaram 37, correspondentes a 43,1 km ou 82,3% do rio. Destas, 19 (21,3 km 40,65% do rio) apresentaram significância para o ajuste MCf, incluídos os casos DCv, RCv e TCv; 4 zonas (3,3 km ou 6,3%) para o ajuste ECf; 13 (17,5 km ou 33,35%) para a interação MCf-ECf; e 1 (1,1 km ou 2,0%) para MCf-SCf. As interações incluem os casos DCv e RCv.

Tabela 8 – Sensitividade do canal fluvial de acordo com a subdivisão em zonas morfológicas.

Período	**Zona morfológica**	**Resultado do teste**	**Conclusão**	**Principais ajustes geomórficos**
30/1/2019 a 15/4/2019	1, 2, 6, 7, 10, 11, 15, 16, 18, 23, 24, 26, 35, 44	$p > 0,05$	Estável	Sem ajuste significativo
	3, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	$p < 0,05$	Sensível	MCf – ECf
15/11/2020 a 30/12/2020	1, 6, 9, 10, 14, 16, 17, 19, 28, 29, 30, 31, 35		Insensível	Sem ajuste observado
	2, 5, 7, 12, 13, 15, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 36, 42	$p > 0,05$	Estável	Sem ajuste significativo
	3, 4, 8, 11, 23, 27, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	$p < 0,05$	Sensível	MCf – ECf – SCf
23/2/2021 a 10/3/2021	1, 10, 14, 25, 36		Insensível	Sem ajuste observado
	2, 6, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 18, 22, 26, 27, 28, 29, 31, 35, 40, 44, 45	$p > 0,05$	Estável	Sem ajuste significativo
	3, 4, 5, 8, 12, 13, 19, 20, 21, 23, 24, 30, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	$p < 0,05$	Sensível	MCf – ECf

Para a segunda relação, as zonas Insensíveis totalizaram 13 (9,9 km ou 18,8% do rio), as Estáveis somaram 15 (12,5 km ou 23,7%) e as Sensíveis corresponderam a 24 (30,3 km ou 57,6%) (Tabela 8, Figura 43B). Ajustes significativos se distribuíram entre ECf em 17 (21,6 km ou 41,15%), MCf em 3 (3,7 km ou 7,05%), SCf em 1 (0,7 km ou 1,3%) e 3 para a interação MCf-SCf (4,3 km ou 8,1%).

Na terceira relação, as Insensíveis somaram 5 (3,5 km ou 6,6%), as Estáveis totalizaram 19 (15,0 km ou 28,7%) e as Sensíveis corresponderam a 28 (34,0 km ou 64,7%) (Tabela 8, Figura 43C). Nestas, os ajustes foram ECf em 9 (12,3 km ou 23,5%), MCf em 8 (8,1 km ou 15,4%), incluídos os casos DCv e RCv e 11 com a interação MCf-ECf (13,6 km ou 25,8% do rio), incluídos os casos DCv e RCv.

Considerando os três períodos equivalentes às três relações temporais, zonas Insensíveis e Estáveis corresponderam a 10 (5,6 km ou 10,8%, considerando uma extensão média de 52,5 km para o rio), enquanto 42 (46,9 km ou 89,2%) foram Sensíveis aos eventos extremos de ao menos um período (Tabela 9, Figura 43D).

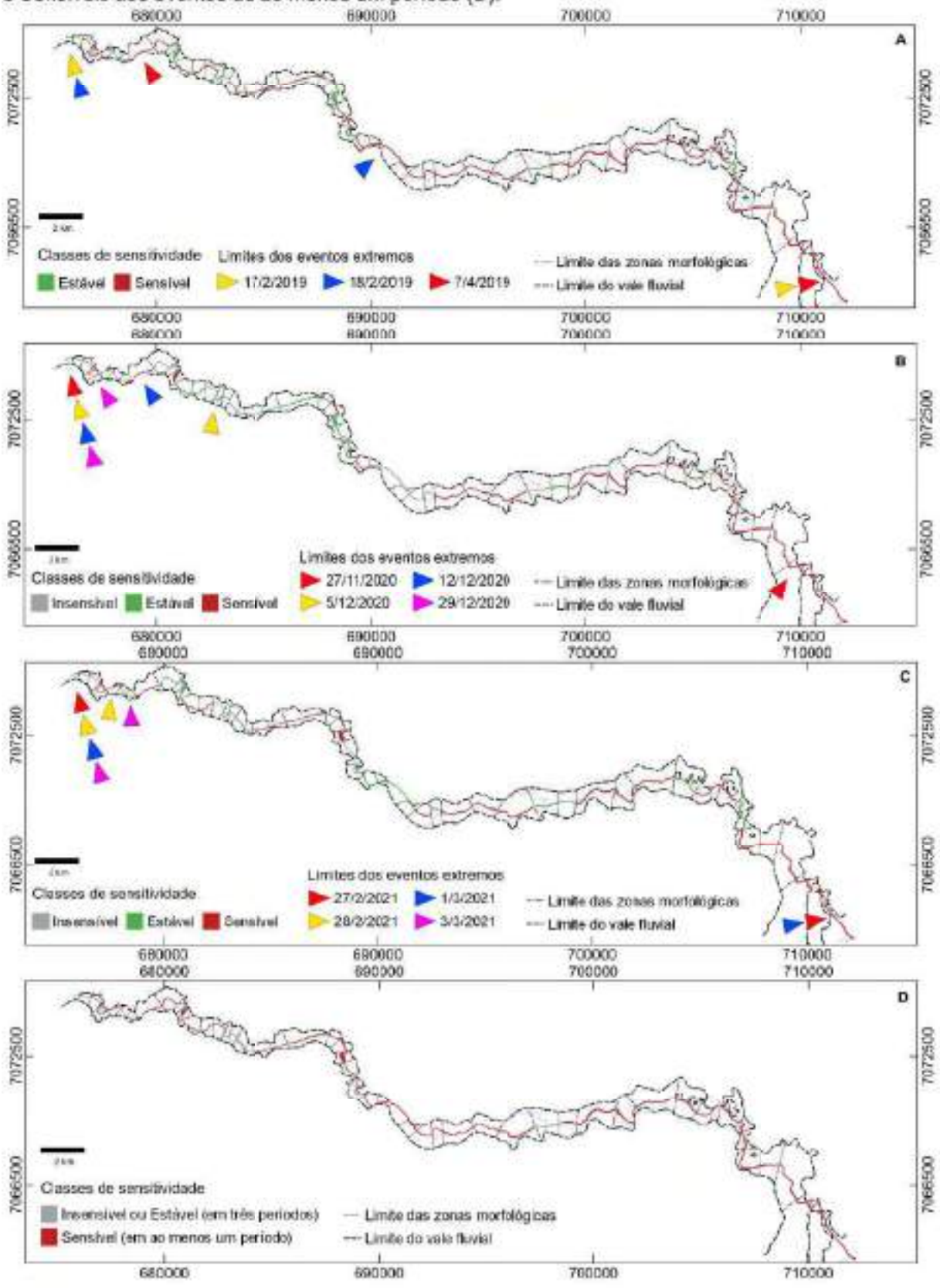
Tabela 9 – Sensitividade do canal fluvial de acordo com a subdivisão em zonas morfológicas, considerando os três períodos de observação.

Período	Zona morfológica	Conclusão	Principais ajustes geomórficos
30/1/2019 a 15/4/2019, 15/11/2020 a 30/12/2020 e 23/2/2021 a 10/3/2021	1, 2, 6, 7, 10, 15, 16, 18, 26, 35	Insensível ou Estável nos três períodos	Sem ajuste observado ou significativo
	3, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	Sensível em ao menos um período	Ajuste significante em ao menos um período

Nesse sentido, ajustes geomórficos significativos, identificados através de procedimentos de morfometria das geoformas da paisagem fluvial e da análise da significância através do teste dos postos sinalizados de Wilcoxon, foram Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf) e Estreitamento de Canal Fluvial (SCf). Estes ajustes, conceituados em Brierley e Fryirs (2005) e Fryirs et al. (2009), foram decorrentes de eventos extremos de precipitação classificados como Chuva Intensa (CI) e Chuva Persistente (CP) conforme critérios de identificação de Cardoso et al. (2020).

Ainda que os eventos extremos, distribuídos entre os períodos de 30/01/2019 a 15/04/2019, 15/11/2020 a 30/12/2020 e 23/02/2021 a 10/03/2021, tenham apresentado durações variáveis de 1 a 5 dias e que as séries históricas das estações pluviométricas tenham denotado variações na distribuição das chuvas e nos limiares associados ao percentil 99, em conjunto, os eventos afetaram significativamente 89,2% do rio Itapocu na área de estudos. Esta, a parcela do rio considerada Sensível. Por outro lado, cerca de 10,8% mostrou-se Insensível aos eventos, sem a ocorrência de ajustes, ou Estável, sem ajustes significativos.

Figura 43 – Sensitividade do canal fluvial aos eventos extremos de 30/01/2019 a 15/04/2019 (A); 15/11/2020 a 30/12/2020 (B); 23/02/2021 a 10/03/2021 (C); Insensíveis ou Estáveis nos três períodos e Sensíveis aos eventos de ao menos um período (D).



Variações na sensitividade foram observadas em cada relação temporal. No

período de 15/11/2020 a 30/12/2020, houve a maior incidência de zonas Insensíveis (18,8%) e a menor de zonas Sensíveis (57,6%). As zonas Estáveis corresponderam a (23,7%). Por outro lado, entre 30/01/2019 e 15/04/2019 não houve registro de zonas Insensíveis, houve a menor incidência de zonas Estáveis (17,7%) e a maior de zonas Sensíveis (82,3%). Entre 23/02/2021 e 10/03/2021, as zonas Insensíveis corresponderam a 6,65%, as Estáveis a 28,65% e as Sensíveis 64,7%.

Denota-se que em 2019, houve a menor quantidade de dias com eventos de CI (17/02/2019, 18/02/2019 e 07/04/2019). Entretanto, os eventos tiveram como característica uma maior distribuição geográfica da precipitação acima 100 mm. Ou seja, estes eventos foram registrados em um maior número de estações pluviométricas. A CI, por outro lado, culminou em um período relativamente maior de CP (15/02/2019 a 19/02/2019), acumulados totais variando entre 194,8 mm e 291,6 mm, de acordo com cada estação pluviométrica. Em 2020, houve uma maior quantidade de dias de CI (27/11/2020, 05/12/2020, 06/12/2020, 12/12/2020 e 29/12/2020). Entretanto, os eventos superiores a 100 mm foram menos abrangentes tanto geograficamente, como temporalmente, não implicando em CP. Já em 2021, os eventos de CI (27/02/2021, 28/02/2021, 01/03/2021 e 03/03/2021) foram mais abrangentes temporalmente do que em 2019. A CI acima de 100 mm apresentou ampla distribuição entre as estações pluviométricas, mas ocorreu apenas no dia 27/02/2021. Desse modo, a CP associada (26/02/2021 a 01/03/2021) apresentou abrangência temporal menor do que em 2019.

Considerando que em sentido geral os eventos extremos ocorridos nesses períodos atingiram a plenitude da área de estudos. Os resultados denotam que a sensitividade da paisagem fluvial é influenciada pela intensidade dos eventos extremos em termos de volume de precipitação, pela distribuição geográfica (espacial) desses eventos e pela persistência ao longo do tempo. Nesse sentido, quanto maior a quantidade dias de CI, com maior volume de precipitação diária e maior abrangência geográfica, maior será a persistência dos eventos tanto no tempo, como no espaço. Desse modo, haverá a tendência de maior incidência de zonas Sensíveis e menor de zonas Insensíveis. Haverá uma tendência de menor quantidade de zonas Estáveis. Entretanto, o grau de intensidade das chuvas, associado à distribuição espacial e temporal dos eventos extremos, é diretamente relacionado ao quantitativo de zonas Sensíveis e Insensíveis da paisagem.

Vandenberghe (2003) considera que a estruturação do substrato do ambiente

fluvial pode tornar difícil a correlação entre processos climáticos e processos morfodinâmicos fluviais. Conforme extrai-se de Scheidegger (1973) e Basso et al. (2015) essa correlação será especialmente difícil quando o contexto climático não produzir eventos extremos capazes de afetar o regime hídrico dos rios. Entretanto, conforme indicam os resultados e Deal et al. (2018), episódios de extremos, modificam a paisagem de acordo com a sua intensidade e persistência. Nesse sentido é hipoteticamente plausível que um evento extremo de precipitação, em altíssimo grau de intensidade de precipitação diária e de persistência espaço-temporal, seja capaz de provocar a desestabilização de uma paisagem situada em terreno altamente estruturado (por exemplo, em zonas de cisalhamento) e cujos processos morfodinâmicos são altamente influenciados por estruturas geológicas tais como falhas, fraturas, etc.

Nesse sentido, a sensitividade denota a paisagem como o produto desses fenômenos que organizam e retrabalham as geoformas (FRYIRS, 2017). O termo reflete as alterações reconhecíveis e significantes produzidas por fenômenos (BRUNSDEN; THORNES, 1979) que não são temporalmente isolados ou desconcatenados, mas ocorrem em um contexto dinâmico (MENEGAT; FERNANDES, 1994) que sobrepõe camadas de distúrbios que estimulam as alterações paisagísticas no tempo.

Alterações significantes na paisagem derivam da ação humana e de processos que produzem alterações nos níveis de base dos rios, como aqueles climáticos e tectônicos (SCHUMM, 1979; 1993). Este trabalho objetivou a análise dos extremos de precipitação como fatores derivados do clima com capacidade de desestabilização da paisagem dos rios, concluindo que o rio Itapocu foi Sensível aos eventos extremos. Isso significa que a paisagem do sistema fluvial respondeu ativamente ao estresse imposto pelos fenômenos.

Entretanto, os rios respondem de diferentes formas aos eventos extremos e às mudanças climáticas, pois são produtos de interações heterogêneas do clima, da fitofisionomia e do substrato do sistema fluvial (PRUDHOMME et al. 2013a, 2013b; BASSO et al. 2015; DEAL et al. 2018). Essa complexidade torna complexa a avaliação da sensitividade, tendo em vista a variabilidade de respostas produzidas pelo ambiente (LISENBY et al. 2020). Para cada sistema em particular, o reconhecimento das causas e das respostas é fundamental para o entendimento da sensitividade (SANTOS; MARÇAL, 2021), especialmente em um cenário de

mudanças climáticas. Denota-se a necessidade de aproximação dos modelos de ajustes geomórficos e de avaliação da sensitividade da realidade imposta pelas heterogeneidades.

4.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E DIREÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Os procedimentos morfométricos, de subdivisão da paisagem em zonas morfológicas e os testes estatísticos foram eficientes para a detecção e a significação dos ajustes nas geoformas.

Entretanto, limitações são impostas pela resolução espacial que reduz a acurácia posicional das geoformas vetorizadas e embutem erro à morfometria. A acurácia indica a proximidade que a informação geoespacial está em relação ao terreno, sendo recomendável que se estabeleçam parâmetros de tolerância com afinidade aos objetivos da pesquisa (TOLENTINO et al. 2017), pois quanto menor a acurácia dos objetos, menor é a potencialidade de detecção de ajustes na paisagem e menos eficiente será a análise da sensitividade.

Produtos de precipitação como o MERGE, têm aplicações limitadas na avaliação das modificações da paisagem devido à baixa resolução espacial, sendo aplicáveis na contextualização regional dos fenômenos de precipitação. A análise dos fenômenos em nível local, na escala das geoformas fluviais, demanda detalhe que pode ser fornecido por estações pluviométricas. A interpolação desses dados possibilita a espacialização e a redução das incertezas quanto à distribuição da precipitação, produzindo melhores resultados de acordo com a malha de estações utilizada (ARNON, 1990; CHARLES et al. 2022). Essa espacialização em nível local é desejável devido à variação na distribuição geográfica dos fenômenos, o que pode não ser refletido nos produtos de precipitação.

A resolução temporal é um fator limitador na aplicação de produtos de sensoriamento remoto na análise multitemporal da paisagem (BOOTHROYD et al. 2020). Fenômenos de duração curta, limitada a dias, demandam resolução temporal que reduza o efeito da resiliência. Ou seja, a capacidade de retorno do sistema às condições anteriores ao distúrbio (HOHENSINNER et al. 2014; PHILLIPS; DYKE, 2016) e possibilitem a avaliação multitemporal dessa capacidade após o cessamento do estresse ambiental. A resolução temporal é reduzida por efeitos de obstrução nas imagens, como a cobertura de nuvens (BOOTHROYD et al. 2020) nos dias próximos aos eventos extremos de precipitação.

As bandas Sentinel-2 aplicadas nos procedimentos metodológicos possuem resolução espacial de 10 m e resolução temporal de 5 dias para a constelação e 10 dias para cada satélite individualmente. A resolução temporal é apropriada para a avaliação multitemporal e análise dos efeitos de eventos extremos de precipitação na paisagem fluvial. No entanto, a resolução espacial pode dificultar o uso dos produtos Sentinel-2 em pesquisas cujos objetos de estudo requeiram altas resoluções espaciais ou altos níveis de detalhamento. Nesses casos, é necessário analisar previamente as dimensões do objeto de estudo e avaliar se os produtos Sentinel-2 podem fornecer dados geoespaciais suficientemente precisos.

No contexto da análise da sensitividade baseada na correlação entre eventos extremos de precipitação e alterações morfológicas na paisagem fluvial, sugere-se como possíveis objetivos para futuras pesquisas a análise da influência de determinados fatores na produção de ajustes geomórficos significativos pelos eventos extremos. Fatores tais como: ocupação antrópica, variações no uso e ocupação do solo, estruturação do substrato, padrões de descarga hídrica, inundações, dentre outros. Pesquisas futuras poderão objetivar, ainda, a automatização dos procedimentos morfométricos e de identificação dos ajustes, a seleção de técnicas de interpolação de dados de precipitação para a avaliação da distribuição das chuvas em escala local e a avaliação de produtos de precipitação e de reanálises na avaliação da sensitividade. Finalmente, podem ser objetivos a avaliação da sensitividade fluvial frente a cenários de mudanças climáticas e a produção de modelos geoambientais para o desenvolvimento de políticas públicas, enfrentamento às mudanças climáticas e orientação do uso e ocupação do solo.

4.5 CONCLUSÕES

O rio Itapocu foi majoritariamente Sensível (89,2%) aos eventos de Chuva Intensa (CI) e Chuva Persistente (CP). Os ajustes geomórficos significativos foram Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf) e Estreitamento de Canal Fluvial (SCf). Por outro lado, 10,8% do canal foi Insensível ou Estável. Os limites do vale fluvial foram Insensíveis aos eventos, enquanto as barras fluviais mantiveram-se Estáveis, não apresentando modificações significativas. Denota-se a não uniformidade das respostas das geoformas da paisagem, inclusive quanto aos distintos limiares associados ao percentil 99 das observações das séries históricas das estações pluviométricas.

Nesse sentido, eventos extremos de precipitação têm capacidade variável de modificar a paisagem fluvial, influenciando os processos de formação e esculpimento das geoformas. Portanto, a sensitividade do sistema fluvial varia de acordo com a intensidade, ou volume de precipitação, e a persistência, ou duração do evento ao longo do tempo.

4.6 REFERÊNCIAS

ARNON, K. Application of Kriging Technique to Areal Precipitation Mapping in Arizona. **Geojournal**, v.22, n.4, p.391-398. 1990.

ARCANJO, J. B. A. **Fotogeologia: conceitos, métodos e aplicações**. CPRM/SBG, 2011.

BASSO, S.; FRASCATI, A.; MARANI, M.; SCHIRMER, M.; BOTTER, G. Climatic and landscape controls on effective discharge. **Geophysical Research Letters**, v.42, p.8441–8447. 2015.

BOSTAN, P.A., HEUVELINK, G.B.M., AKYUREK,S.Z. Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.19, p.115-126. 2012.

BOOTHROYD, R.J., WILLIAMS, R.D., HOEY, T.B., BARRETT, B., PRASOJO, O.A. Applications of Google Earth Engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v.8. 2020.

BRIERLEY, G. J.; FRYIRS, K. A. **Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework**. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 398p. 2005.

BRUNSDEN, D.; THORNES, J.B. Landscape sensitivity and change. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v.4, n.4, p.463-484. 1979.

CARDOSO, C.S.; QUADRO, M.F.L.; BONETTI, C. Persistência e Abrangência dos

Eventos Extremos de Precipitação no Sul do Brasil: Variabilidade Espacial e Padrões Atmosféricos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.2, p.219-231. 2020.

CHARLES, T.S., LOPES, T.R., DUARTE, S.N., NASCIMENTO, J.G., RICARDO, H.C., PACHECO, A.B. Estimating average annual rainfall by ordinary kriging and TRMM precipitation products in midwestern Brazil. J**ournal of South American Earth Sciences**, v.118. 2022.

COAN, B.D.P.; BACK, A.J.; BONETTI, A.V. Precipitação mensal e anual provável no Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Climatologia***,* v. 15, p.122-142. 2014.

CROSBY, B.T.; WHIPPLE, K.X. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. **Geomorphology**, 82(1): 16-38. 2006.

DEAL, E.; BOTTER, G.; BRAUN, J. Understanding the role of rainfall and hydrology in determining fluvial erosion efficiency. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v.123, p.744–778. 2018.

FRYIRS, K. A.; SPINK, A.; BRIERLEY, G. Post-European settlement response gradientes of river sensitivity and recovery across the upper Hunter catchment, Australia. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.34, p.897-918. 2009.

FRYIRS, K. A. River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.42, p.55-70. 2017.

GRIMM, A.M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.25, p.537–554. 2011.

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v.4, n.1, p.1-9. 2001.

HAJDUKIEWICZ, H.; WYŻGA, B.; MIKUŚ, P.; ZAWIEJSKA, J.; RADECKI-PAWLIK, A. Impact of a large flood on mountain river habitats, channel morphology, and valley infrastructure. **Geomorphology**, v.272, p.55-67. 2016.

HOLBROOK, J.; SCHUMM, S.A. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. **Tectonophysics**, v.305, p.287-306. 1999.

HOHENSINNER, S., JUNGWIRTH, M., MUHAR, S., SCHMUTZ, S. Importance of multi-dimensional morphodynamics for habitat evolution: Danube River 1715–2006. **Geomorphology**, v.215, p.3-19. 2004.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. Climate Change 2021 – **The Physical Science Basis**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 31p. 2021.

KLEINA, M.; SANTOS, L.J.C. Sensitividade Fluvial da Drenagem Principal da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado – Serra do Mar Paranaense. **RA'E GA – O Espaço Geográfico em Análise**, v.41, p.174-188. 2017.

LISENBY, P.E., FRYIRS, K.A., THOMPSON, C.J. River sensitivity and sediment connectivity as tools for assessing future geomorphic channel behavior. **International Journal of River Basin Management**, v. 18, n.3, p.279-293. 2020.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.7, p.1425-1432. 1996.

MENEGAT, R., FERNANDES, L.A.D. O Método da investigação científica na Geologia: a abordagem através do exemplo heurístico da caixa-preta. **Revista Brasileira de Geociências**, v.24, n.3, p.177-188. 1994.

NUNES, A.B.; SILVA, G.C. Climatology of extreme rainfall events in eastern and northern Santa Catarina State, Brazil: present and future climate. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 31, n. 3, p. 413-425. 2013.

OLIVEIRA, J.C.; AGUIAR, W.; CIRANO, M.; GENZ, F.; AMORIM, F.N. A climatology of the annual cycle of river discharges into the Brazilian continental shelves: from seasonal to interannual variability. **Environmental Earth Sciences**, v.77, n.192. 2018.

PHILLIPS, J.D., DYKE, C.V. Principles of geomorphic disturbance and recovery in response to storms. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.41, p.971-979. 2016.

PINTO, F.M. Depósitos minerais e previsão de impactos ambientais: os modelos genéticos Perau e Panelas no Estado do Paraná (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.8, n.1, p.70–86. 2020.

PINTO, F.M.; WEBER, C. Diagnóstico de uma usina de asfalto: subsídios à avaliação de impactos ambientais através do levantamento histórico e do mapeamento de riscos. **Disciplinarum Scientia Naturais e Tecnológicas**, v.22, n.1, p.81-98. 2021.

PRUDHOMME, C.; CROOKS, S.; KAY, A.L.; REUNARD, N. Climate change and river flooding: parte 1 classifying the sensitivity of British catchments. **Climatic Change**, v.119, p.933-948. 2013a.

PRUDHOMME, C.; CROOKS, S.; KAY, A.L.; REUNARD, N. Climate change and river flooding: parte 2 sensitivity characterisation for british catchments and example vulnerability assessments. **Climatic Change**, v.119, p.949-964. 2013b.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 3, p. 885-894. 2010.

SCHEIDEGGER, A. E. Hydrogeomorphology. **Journal of Hydrology**, v.20, p.193-

215. 1973.

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

SCHUMM, S. A. River response to baselevel change: implication for sequence stratigraphy. **The Journal of Geology**, v.101, n.2, p.279-294. 1993.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v.52, p.591–611. 1965.

SILVA, A. C.; SILVA, O. G. Analises dos padrões e estilos de canais a partir da paisagem geomorfológica fluvial na bacia do rio Una/PE. **Revista Cerrados**, v.14, n.2, p.71-92. 2016.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícias Geomorfológicas**, v.6, n.32, p.71-104, 1976.

TOLENTINO, F. M.; SILVA, C. R.; SANTIL, F. L. P. Avaliação da acurácia posicional de redes de drenagem obtidas a partir de modelos SRTM e ASTER com o uso dos softwares ARCGIS e QGIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.69, v.7, p.1287-1301, 2017.

VANDENBERGHE, J. Climate forcing of fluvial system development: an evolution of ideas. **Quaternary Science Reviews**, v.22, p.2053-2060. 2003.

WHEATON, J. M.; FRYIRS, K.; BRIERLEY, G.; BANGEN, S. G.; BOUWES, N.; O'BRIEN, G. Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms. Geomorphology, v.245, p.273-295. 2015.

WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods. **Biometrics Bulletin**, v.1, n.6, p.80-83. 1945.

5 PRODUTO TÉCNICO OU TECNOLÓGICO: MAPA SÍNTESE DA ANÁLISE DA SENSITIVIDADE

O produto final deste trabalho, denominado Mapa Síntese, apresenta a espacialização das zonas morfológicas homólogas de relevo (Mapa A do Apêndice I). As zonas foram estabelecidas para a setorização do ambiente fluvial e análise da sensitividade fluvial com o apoio do Teste dos Postos Sinalizados de Wilcoxon.

Os Mapas B, C e D reúnem os resultados das análises da sensitividade para os períodos de eventos extremos de precipitação (30/01/2019 a 15/04/2019, 15/11/2020 a 30/12/2020 e 23/02/2021 a 10/03/2021), conforme apresentados no Capítulo 3. Em adição, os mapas compilam os ajustes geomórficos significativos para as zonas morfológicas em cada período. Em ordem de importância, os ajustes identificados nos períodos foram Migração de Canal Fluvial (MCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf) e Estreitamento de Canal Fluvial (SCf). O ajuste MCf inclui os fenômenos de modificação em curvas fluviais.

Em comparação com aqueles ajustes identificados no Capítulo 3, observa-se que a ocorrência de ajustes associados a barras fluviais ativas reduziu-se ao longo do tempo, sendo que a presença de barras fluviais diminuiu consideravelmente entre 1957 e 2021.

Aventa-se que as barras atualmente existentes no rio, estão associadas a geoestruturas, ou a alterações locais na composição do substrato que podem imputar resistência e estabilidade a essas geoformas (Figura 44), favorecendo o aporte e a conservação do sedimento, ante episódios de extremos. A presença de estruturas associadas a leques aluviais e de cascalhos no leito fluvial, possivelmente provenientes de deposição associada a tais leques, com posterior retrabalho no ambiente fluvial atual, são indicativos da influência de estruturas geológicas no desenvolvimento da paisagem fluvial.

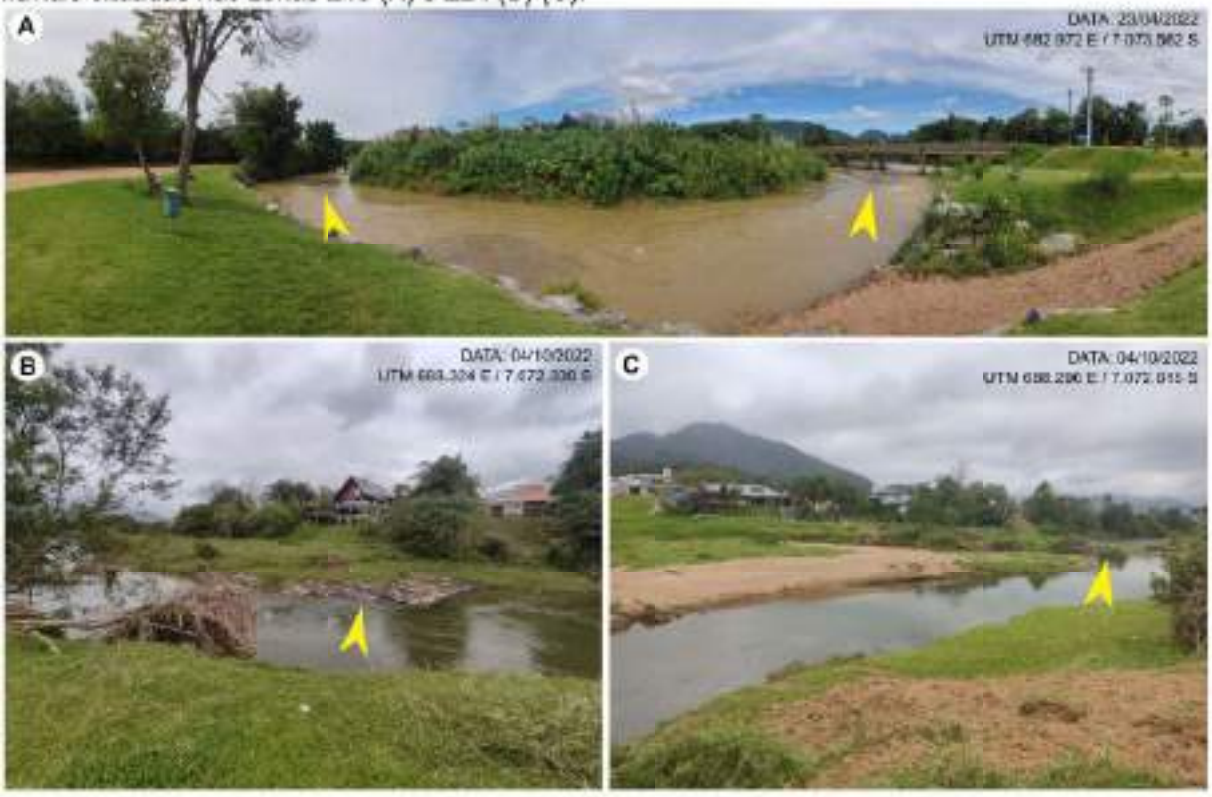
As principais barras em tamanho (Z11, Z15, Z24 e Z29), estão instaladas em zonas características por anomalias de paisagem que implicam em modificações nos padrões geométricos do canal fluvial, em relação às zonas vizinhas. Em geral, estão associadas à mudança local na direção e no aumento em largura do canal.

Essa configuração do substrato rochoso, pode estar associada a processos geodinâmicos de reajuste do gradiente topográfico da bacia hidrográfica, resultantes de eventos de alteração no nível de base fluvial, como de diferenças reológicas nas unidades litoestratigráficas, resultando em erosão diferencial (CROSBY; WHIPPLE,

2006; VERVLOET, 2009).

O Mapa E apresenta as zonas sensíveis em ao menos um período e as zonas que permaneceram estáveis e/ou insensíveis nos três períodos. Denota-se que a área de estudo foi, prioritariamente, sensível aos eventos extremos, sendo principalmente afetada pelos eventos dos anos de 2019 e 2021, conforme exposto no Capítulo 4. O mapa denota que as zonas morfológicas Z1, Z2, Z6, Z7, Z15, Z16, Z18, Z26 e Z35 apresentaram alta resistência geomórfica ou baixa capacidade de produzirem respostas geomórficas significativas diante dos eventos extremos analisados.

Figura 44 – As setas amarelas indicam afloramentos de rochas (*knickpoints*) associados as barras fluviais situadas nas zonas Z15 (A) e Z24 (B) (C).



Em sentido análogo à hipótese sobre a estabilidade das barras fluviais, as zonas insensíveis ou estáveis do canal fluvial podem estar associadas a estruturas do substrato que imputam resistência e estabilidade ao canal fluvial, atenuando os efeitos de eventos pluviométricos extremos.

As geoestruturas do terreno são capazes de regrar os processos morfogenéticos e morfodinâmicos da paisagem, tais como o desenvolvimento de encostas, vales fluviais e a expansão da rede hidrográfica (HARVEY, 2002; SORDI

et al. 2017). Desse modo, essas estruturas agem como reguladores dos processos sedimentares da paisagem fluvial e, consequentemente, da mecânica evolutiva dos rios. Gimenez et al. (2022) concluem que a região apresenta indícios de reativação de falhas, soerguimento e subsidência de blocos crustais no Holoceno, sendo que algumas estruturas possivelmente correspondentes a falhas, coincidem com o rio Itapocu na área de estudo.

Aventa-se que essas reativações influenciam diretamente a organização da rede fluvial atual, proporcionando tanto o desenvolvimento de *knickpoints* que favorecem a estabilidade e insensitividade de algumas barras (Figura 44) e de alguns trechos do canal fluvial. Algumas zonas podem estar associadas a estruturas geológicas penetrativas, instaladas em um substrato com resistência intempérica suficientemente alta para atenuar efeitos de eventos extremos. Algumas curvas fluviais como aquelas das zonas Z15 e Z26, podem estar relacionadas a anomalias de drenagem decorrentes dessa conjectura e não a processos fluvio-sedimentares típicos de formação e abortamento de meandros. Ademais, existem indícios de uma possível alteração no sentido no fluxo do rio Poço Grande, situado na jusante da área de estudos que pode estar correlacionada aos fenômenos aventados por Gimenez et al. (2022). Inclusive, que o rio Poço Grande pode corresponder a um antigo canal do rio Piraí, afetado por processos neotectônicos.

5.1 OUTROS PRODUTOS TÉCNICOS OU TECNOLÓGICOS

– Capítulo 3: Artigo submetido à Revista Brasileira de Geomorfologia (ISSN 2236-5664);

– Capítulo 4: Artigo submetido à revista *Resources, Environment and Sustainability* (ISSN 2666-9161);

– Apêndice II: Mapa com o detalhamento das geoformas associadas ao vale fluvial, conforme apresentadas no Capítulo 3. O mapa detalha as Figuras 8, 9, 10 e 11 do referido capítulo;

– Apêndice III: Resumo expandido apresentado na V Jornada em Clima e Ambiente (2021) e publicado na categoria comunicação de pesquisa na revista Estrabão (ISSN 2763-7824). DOI: https://doi.org/10.53455/re.v2i.40

– Apêndice IV: Artigo publicado na revista *Resources, Environment and Sustainability* (ISSN 2666-9161), correspondente à versão sintética e em inglês do Capítulo 4 desta dissertação. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resenv.2023.100124

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise morfométrica de geoformas da paisagem entre os anos de 1957, 1978, 2010 e 2021 (Capítulo 3), identificou os principais tipos de ajustes geomórficos incidentes no rio Itapocu. Estes, foram classificados em Expansão de Barra Fluvial Ativa (EBf), Retraimento de Barra Fluvial Ativa (RBf), Estreitamento de Canal Fluvial (SCf), Expansão de Canal Fluvial (ECf) e Migração de Canal Fluvial (MCf) Incorporação de Barra Fluvial Ativa à Planície de Inundação (IBf), Rotação de Curva Fluvial (RCf), Translação de Curva Fluvial (TCf) e Deslocamento Lateral da Curva Fluvial (DCf). O ajuste IBf está associado a processos de SCf, enquanto os ajustes RCf, TCf e DCf estão associados a processos de MCf.

Entre os anos, as principais formas de ajustes foram MCf, ECf e SCf. A RBf contribuiu para substancial redução em área das barras fluviais ativas, bem como à incorporação destas às planícies de inundação adjacentes ao rio.

A classificação dos ajustes ocorridos entre 1957 e 2021, foi utilizada para a análise da influência de eventos extremos de precipitação na paisagem fluvial (Capítulo 4).

Eventos de Chuva Intensa (CI) e Chuva Persistente (CP), incidentes nos períodos de 30/01/2019 a 15/04/2019, 15/11/2020 a 30/12/2020 e 23/02/2021 a 10/03/2021, foram correlacionados aos ajustes constatados nesses períodos.

Os eventos produziram ajustes significativos na paisagem fluvial, concernentes à MCf, ECf e SCf. Em conjunto, os eventos de CI e CP afetaram significativamente 89,2% do rio na área de estudo, esta a parcela considerada Sensível. Em contraponto, 10,8% do rio se mostrou Insensível, sem a incidência de ajustes, ou Estável, sem a ocorrência de ajustes significativos. Nesse contexto, os limites do vale fluvial foram Insensíveis aos eventos, enquanto as barras fluviais mantiveram-se estáveis, não apresentando modificações significativas.

Provavelmente a estabilidade e a insensitividade de certas geoformas, estão associadas à geoestruturas ou a alterações na composição do substrato que podem imputar resistência e estabilidade local à paisagem, resultando em baixa capacidade de produção de respostas geomórficas significativas diante de eventos extremos.

Nesse sentido, eventos extremos de precipitação têm capacidade variável de modificar a paisagem fluvial, influenciando os processos de formação e esculpimento das geoformas.

7 REFERÊNCIAS GERAIS

BARROS, A.C.M.; SOUZA, J.O.P.; CORRÊA, A.C.B. Sensitividade da paisagem na bacia do riacho do Mulungu, Belém de São Francisco, Pernambuco. **Revista de Geografia**, v. especial VIII SINAGEO, n.2, p.108-120. 2010.

BASSO, S.; FRASCATI, A.; MARANI, M.; SCHIRMER, M.; BOTTER, G. Climatic and landscape controls on effective discharge. **Geophysical Research Letters**, v.42, p.8441–8447. 2015.

BERTRAND, M.; PIÉGAY, H.; PONT, D.; LIÉBAULT, F.; SAUQUET, E. Sensitivity analysis of environmental changes associated with riverscape evolutions following sediment reintroduction: geomatic approach on the Drôme river network, France. **International Journal of River Management**, v.11, n.1, p.19-32. 2013.

BOWER, D.; HANNAH, D.M.; McGREGOR, G.R. Techniques for assessing the climatic sensitivity of river flow regimes. **Hydrological Processes**, v.18, p.2515-2543. 2004.

BRUNSDEN, D.; THORNES, J.B. Landscape sensitivity and change. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v.4, n.4, p.463-484. 1979.

BURAAS, E.M.; RENSHAW, C.E.; MAGILLIGAN, F.J.; DADE, W.B. Impact of reach geometry on stream channel sensitivity to extreme floods. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.39, p.1778-1789. 2014.

CARDOSO, C.S.; QUADRO, M.F.L.; BONETTI, C. Persistência e Abrangência dos Eventos Extremos de Precipitação no Sul do Brasil: Variabilidade Espacial e Padrões Atmosféricos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.2, p.219-231. 2020.

CROSBY, B.T.; WHIPPLE, K.X. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. **Geomorphology**, v.82, n.1, p.16-38. 2006.

DEAL, E.; BOTTER, G.; BRAUN, J. Understanding the role of rainfall and hydrology

in determining fluvial erosion efficiency. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v.123, p.744–778. 2018.

FRYIRS, K.A.; SPINK, A.; BRIERLEY, G. Post-European settlement response gradientes of river sensitivity and recovery across the upper Hunter catchment, Australia. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.34, p.897-918. 2009.

FRYIRS, K.; LISENBY, P.; CROKE, J. Morphological and historical resilience to catastrophic flooding: the case of Lockyer Creek, SE Queensland, Australia. **Geomorphology**, v.241, p.55-71. 2015.

FRYIRS, K.A. River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.42, p.55-70. 2017.

GILBERT, G.K. Report on the Geology of the Henry Mountains, US Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region. **Government Printing Office**, 170 pp. 1877.

GIMENEZ, V. B.; SALAMUNI, E.; SANTOS, J. M.; PEYERL, W. R. L.; FARIAS, T. F. S.; SANCHES, E. The role of fault reactivation in the geomorphological evolution of coastal landforms on passive continental margins: Evidence from a tectonic estuary in southern Brazil. **Geomorphology**, 402: p.10832. 2022.

HARVEY, A. M. The role of base-level change in the dissection of alluvial fans: case studies from southeast Spain and Nevada. **Geomorphology**, v.45, p.67-87. 2002.

HOLBROOK, J.; SCHUMM, S.A. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. **Tectonophysics**, v.305, p.287-306. 1999.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. Climate Change 2021 – **The Physical Science Basis**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 31p. 2021.

JHA, M.; ARNOLD, J.G.; GASSMAN, P.W.; GIORGI, F.; GU, R.R. Climate change sensitivity assessment on Upper Mississippi river basin streamflows usin SWAT. **Journal of the american water resources association**, v.42, n.4, p.997-1015. 2006.

KHAN, S.; FRYIRS, K. An approach for assessing geomorphic river sensitivity across a catchment based on analysis of historical capacity for adjustment. **Geomorphology**, v.359. 2020.

KLEINA, M.; SANTOS, L.J.C. Sensitividade Fluvial da Drenagem Principal da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado – Serra do Mar Paranaense. **RA'E GA – O Espaço Geográfico em Análise**, v.41, p.174-188. 2017.

NOTEBAERT, B.; VERSTRAETEN, G. Sensitivity of west and central european river systems to environmental changes during the Holocen: a review. **Earth-Science Reviews**, v.103, p.163-182. 2010.

PRESTON, N.; BRIERLEY, G.; FRYIRS, K. The Geographic Basis of Geomorphic Enquiry. **Geography Compass**, v.5, p.21-34. 2011.

PRUDHOMME, C.; CROOKS, S.; KAY, A.L.; REUNARD, N. Climate change and river flooding: parte 1 classifying the sensitivity of British catchments. **Climatic Change**, v.119, p.933-948. 2013a.

PRUDHOMME, C.; CROOKS, S.; KAY, A.L.; REUNARD, N. Climate change and river flooding: parte 2 sensitivity characterisation for british catchments and example vulnerability assessments. **Climatic Change**, v.119, p.949-964. 2013b.

REID, H.E.; BRIERLEY, G.J. Assessing geomorphic sensitivity in relation to river capacity for adjustment. **Geomorphology**, v.251, p.108-121. 2015.

RODRIGUES, J.M.; SOUZA, J.O.P. Tipologia de canais fluviais como mecanismo de identificação da sensitividade e potencial de recuperação em uma bacia de

drenagem no semiárido paraibano – Município de São João do Tigre (PB). **Revista de Geociências do Nordeste**, v.6, n.2, p.266-275. 2020.

RODRIGUES, J.M. **Modificações geomórficas nos estilos fluviais da bacia do alto curso do rio Piranhas, semiárido paraibano**. João Pessoa, 2021. 106p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba.

SANTOS, R.C.; MARÇAL, M.S. Caracterização dos ajustes e mudanças na morfologia do rio São João, região das baixadas litorâneas do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.22, n.1: 149-162. 2021.

SILVA, W.F. **Análise da relação processo-resposta entre dinâmicas atmosféricas e sensitividade ambiental do riacho Umas – Camaragibe/PE**. Recife, 2015. 136p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco.

SILVA, A.C.; SILVA, O.G. Análises dos padrões e estilos de canais a partir da paisagem geomorfológica fluvial na bacia do rio Una/PE. **Revista Cerrados**, v.14, n.2, p.71-92. 2016.

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

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

SCHUMM, S.A. River response to baselevel change: implication for sequence stratigraphy. **The Journal of Geology**, v.101, n.2, p.279-294. 1993.

SIMONOVIC, S.P.; LI, L. Sensitivity of the Red river basin flood protection system to climate variability and change. **Water Resources Management**, v.18, p.89-110. 2004.

SOUZA, J.; BARROS, A.; CORREA, A. Sensitividade da paisagem: aplicação em canais fluviais semiáridos – Serra Talhada/PE. **Revista Geonorte**, Edição Especial 4, v.10, n.1, p.465-470. 2014.

SOUZA, J.O.P.; CORRÊA, A.C.B. Análise da sensitividade da paisagem na bacia do riacho do Saco – PE. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.16, n.4, p.615-630. 2015.

SORDI, M. V.; SALGADO, A. A. R.; SIAME, L.; BOURLÈS, D.; PAISANI, J. C.; LÉANNI, L.; BRAUCHER, R.; COUTO, E. V.; AUMAÎTRE, G.; KEDDADOUCHE, K. Implications of drainage rearrangement for passive margin escarpment evolution in southern Brazil. **Geomorphology**, 306: 155–169. 2018.

VERVLOET, R.J.H.M. **Condicionantes morfológicos e estruturais na dinâmica fluvial da bacia hidrográfica do Rio Benevente – Espírito Santo**. São Paulo, 2009. 478p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Facultade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

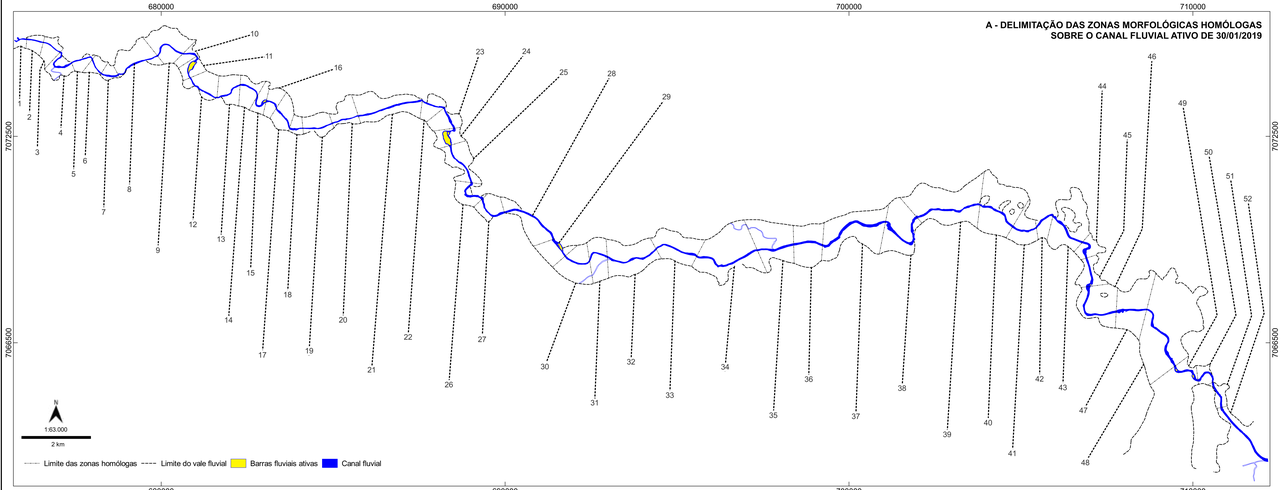
VITAL, M. **Sensibilidade paisagística e grau de instabilidade: um estudo da dinâmica geomorfológica em áreas com risco de erosão no alto curso da sub-bacia do rio Taperoá, Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil**. Recife, 2011. 110p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco.

VILLAS-BOAS, G.H.; MARÇAL, M.S. Avaliação da sensitividade do sistema fluvial no alto-médio vale do rio Macaé (RJ). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n1, p.93-102. 2013.

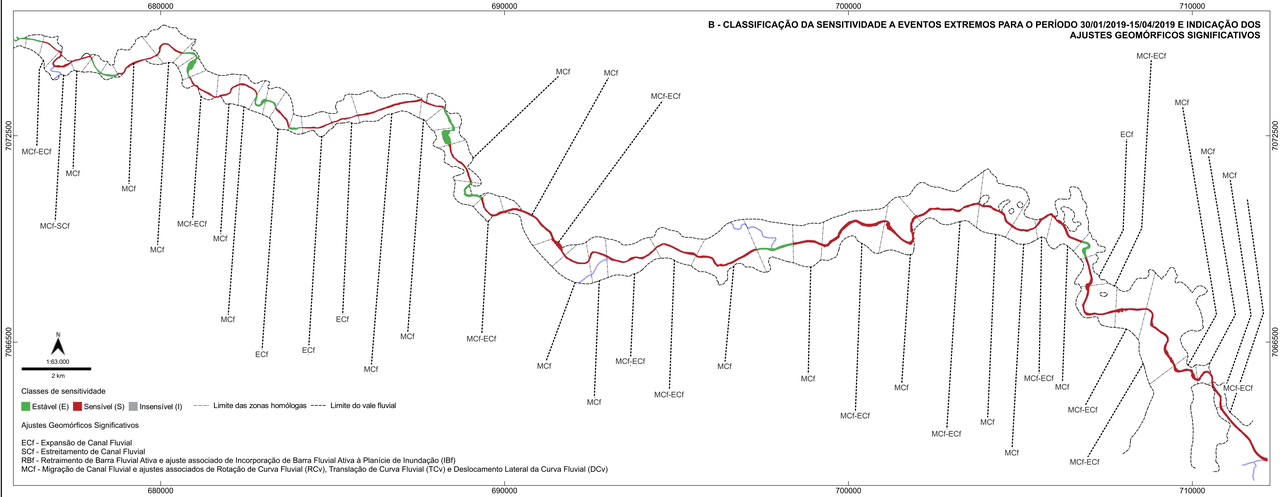
APÊNDICES

APÊNDICE I – MAPA SÍNTESE DA ANÁLISE DA SENSITIVIDADE

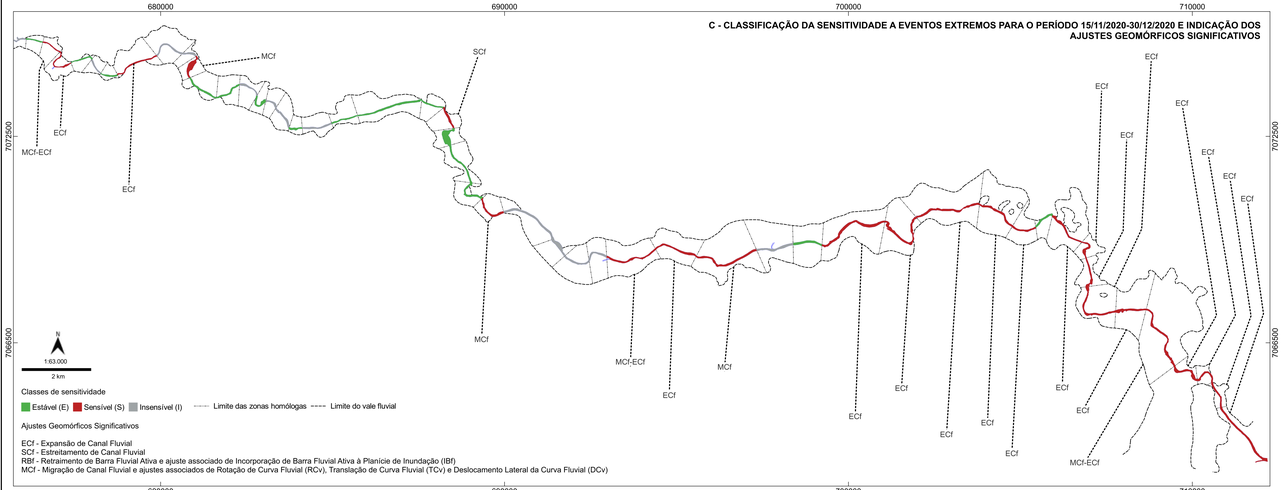
A - DELIMITAÇÃO DAS ZONAS MORFOLÓGICAS HOMÓLOGAS SOBRE O CANAL FLUVIAL ATIVO DE 30/01/2019



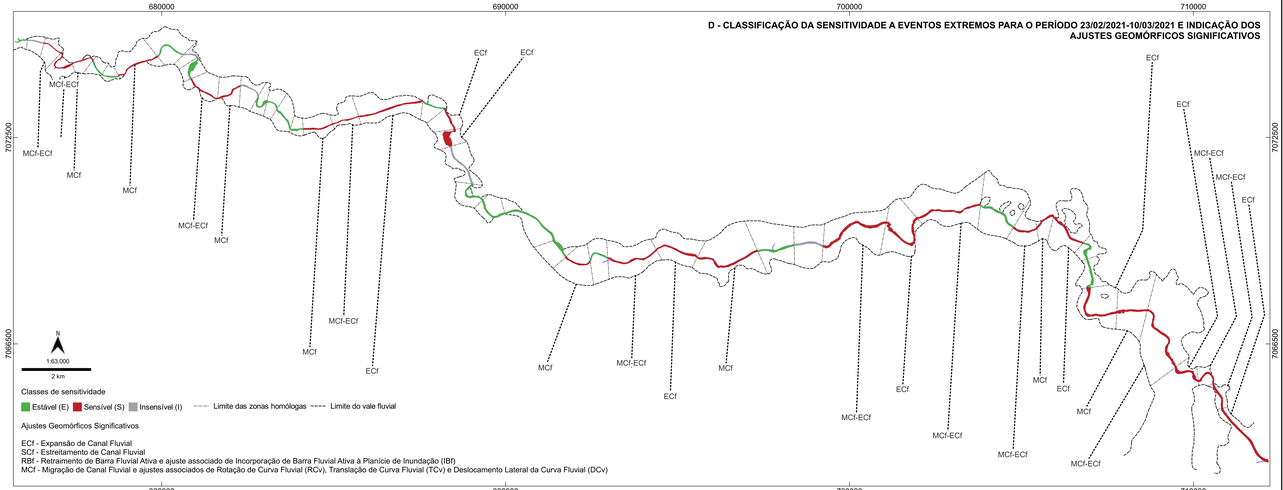
B - CLASSIFICAÇÃO DA SENSITIVIDADE A EVENTOS EXTREMOS PARA O PERÍODO 30/01/2019-15/04/2019 E INDICAÇÃO DOS AJUSTES GEOMÓRFICOS SIGNIFICATIVOS



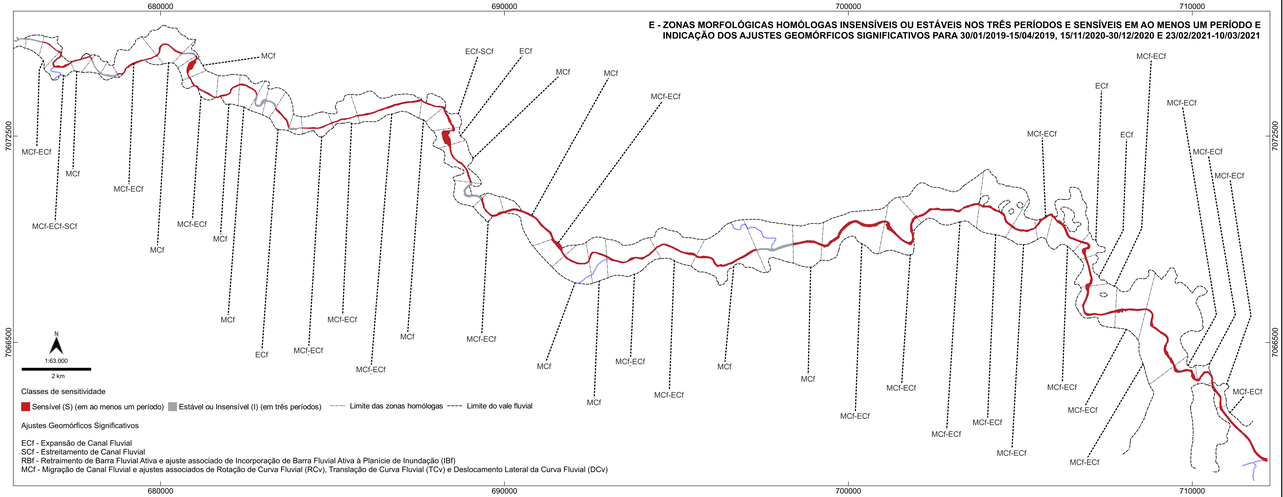
C - CLASSIFICAÇÃO DA SENSITIVIDADE A EVENTOS EXTREMOS PARA O PERÍODO 15/11/2020-30/12/2020 E INDICAÇÃO DOS AJUSTES GEOMÓRFICOS SIGNIFICATIVOS

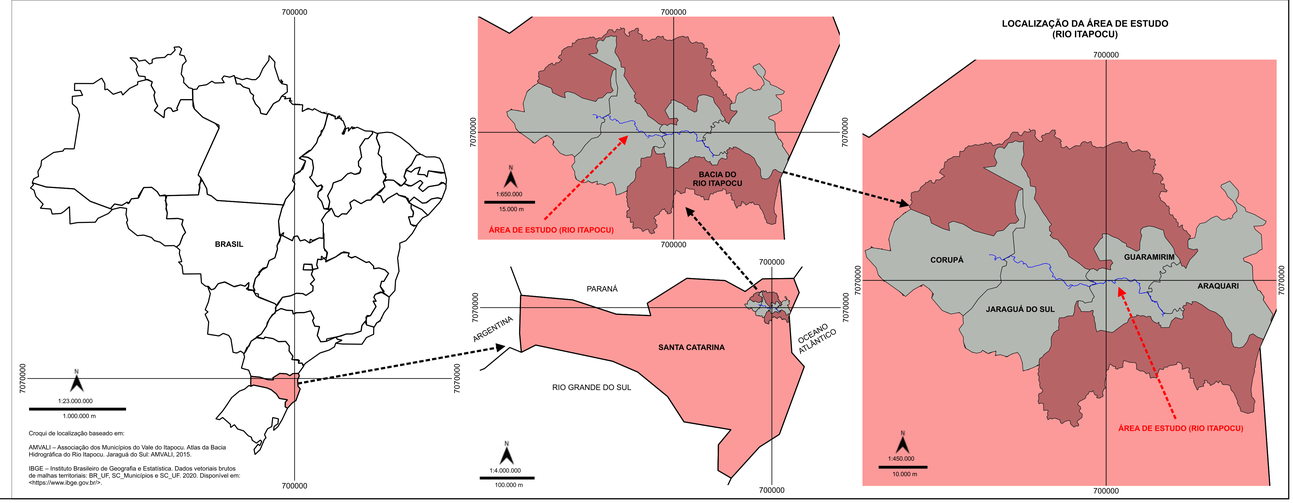


D - CLASSIFICAÇÃO DA SENSITIVIDADE A EVENTOS EXTREMOS PARA O PERÍODO 23/02/2021-10/03/2021 E INDICAÇÃO DOS AJUSTES GEOMÓRFICOS SIGNIFICATIVOS



E - ZONAS MORFOLÓGICAS HOMÓLOGAS INSENSÍVEIS OU ESTÁVEIS NOS TRÊS PERÍODOS E SENSÍVEIS EM AO MENOS UM PERÍODO E INDICAÇÃO DOS AJUSTES GEOMÓRFICOS SIGNIFICATIVOS PARA 30/01/2019-15/04/2019, 15/11/2020-30/12/2020 E 23/02/2021-10/03/2021

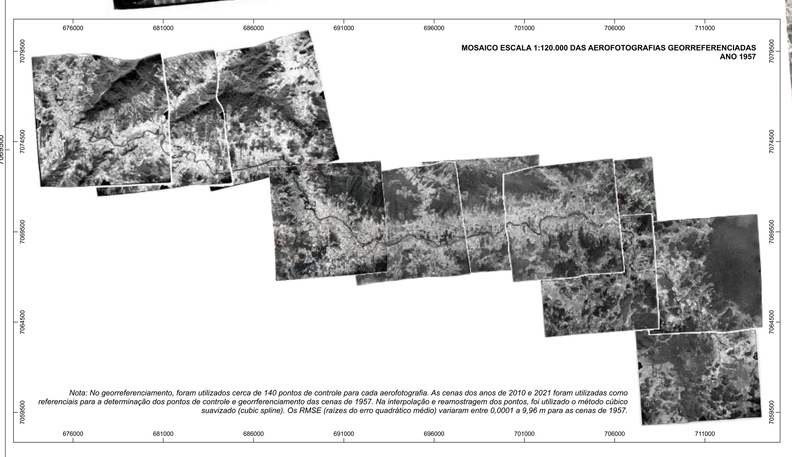




APÊNDICE II – MAPA DAS GEOFORMAS ASSOCIADAS AO VALE FLUVIAL

A - UNIDADES GEOMÓRFICAS DEFINIDAS ATRAVÉS DA FOTOINTERPRETAÇÃO DE ELEMENTOS TEXTURAIS E ESTRUTURAIS DAS AEROFOTOGRAFIAS ANO DE 1957

Origem das aerofotografias: Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A. Escala 1:25.000. Cenas: 2169, 3350, 3353, 3780, 3782, 3784, 3786, 3787, 9035, 9036, 9038. Cedidas por: Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina - SDE.



LEGENDA

- Barras fluviais ativas
- Rio Itapocu e Principais Afluentes

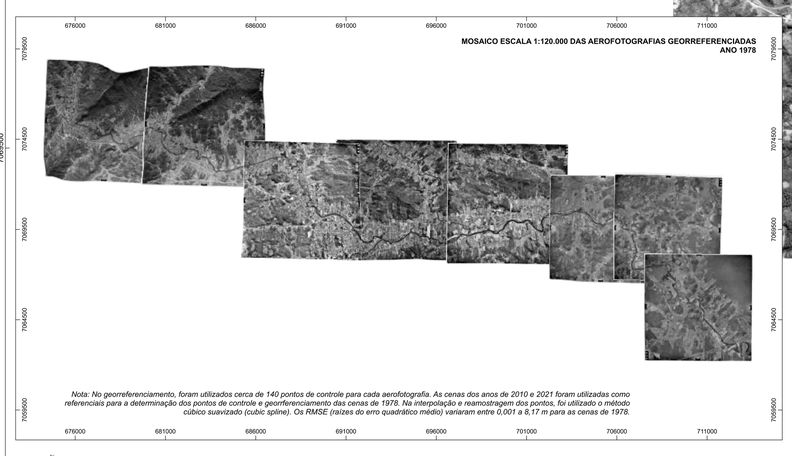
Limites do Vale Fluvial (Contatos com as Geoformas das Encostas)
- Embasamento cristalino
- Terraços colúvio-aluvionares

Geoformas do Vale Fluvial
- Barras fluviais
- Terraços fluviais
- Planícies de inundação indiferenciadas

Estruturas Fluviais
- Cordões marginais
- Bordas de terraços fluviais
- Paleocanais fluviais

B - UNIDADES GEOMÓRFICAS DEFINIDAS ATRAVÉS DA FOTOINTERPRETAÇÃO DE ELEMENTOS TEXTURAIS E ESTRUTURAIS DAS AEROFOTOGRAFIAS ANO DE 1978

Origem das aerofotografias: Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A. Escala 1:25.000. Cenas: 11184, 11188, 11193, 14434, 14439,15928, 15930, 16047. Cedidas por: Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina - SDE.



LEGENDA

- Barras fluviais ativas
- Rio Itapocu e Principais Afluentes

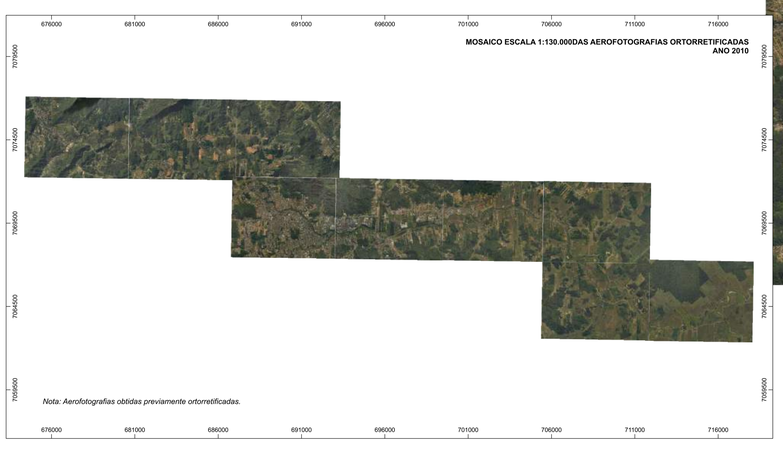
Limites do Vale Fluvial (Contatos com as Geoformas das Encostas)
- Embasamento cristalino
- Terraços colúvio-aluvionares

Geoformas do Vale Fluvial
- Barras fluviais
- Terraços fluviais
- Planícies de inundação indiferenciadas

Estruturas Fluviais
- Cordões marginais
- Bordas de terraços fluviais
- Paleocanais fluviais

C - UNIDADES GEOMÓRFICAS DEFINIDAS ATRAVÉS DA FOTOINTERPRETAÇÃO DE ELEMENTOS TEXTURAIS E ESTRUTURAIS DAS AEROFOTOGRAFIAS ANO DE 2010

Origem das aerofotografias: Engemap. Resolução Espacial 0,39 m. Cenas: Orto-RGB_SG-22-Z-B-I-4, Orto-RGB_SG-22-Z-B-II-3, Orto-RGB_SG-22-Z-B-V-1. Cedidas por: Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina - SDE.



LEGENDA

- Barras fluviais ativas
- Rio Itapocu e Principais Afluentes

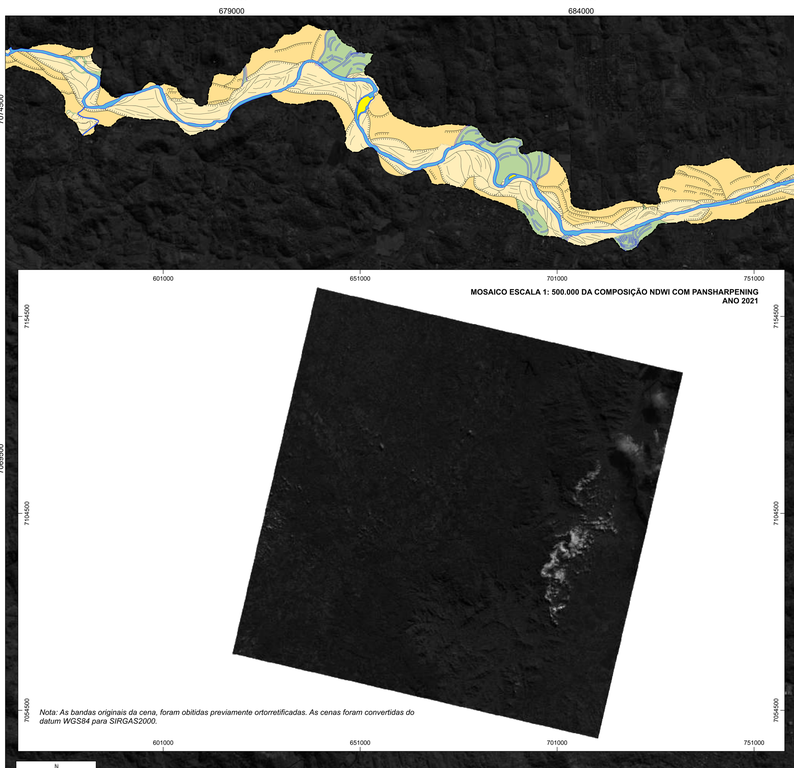
Limites do Vale Fluvial (Contatos com as Geoformas das Encostas)
- Embasamento cristalino
- Terraços colúvio-aluvionares

Geoformas do Vale Fluvial
- Barras fluviais
- Terraços fluviais
- Planícies de inundação indiferenciadas

Estruturas Fluviais
- Cordões marginais
- Bordas de terraços fluviais
- Paleocanais fluviais

D - UNIDADES GEOMÓRFICAS DEFINIDAS ATRAVÉS DA FOTOINTERPRETAÇÃO DE ELEMENTOS TEXTURAIS E ESTRUTURAIS DAS IMAGENS ORBITAIS ANO DE 2021

Origem da imagem orbital: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. CBERS 04A. Resolução Espacial 2 m. Bandas da Cena: CBERS_4A_WPM_20210625_205_146_L4. Composição NDWI com Pansharpening.



LEGENDA

- Barras fluviais ativas
- Rio Itapocu e Principais Afluentes

Limites do Vale Fluvial (Contatos com as Geoformas das Encostas)
- Embasamento cristalino
- Terraços colúvio-aluvionares

Geoformas do Vale Fluvial
- Barras fluviais
- Terraços fluviais
- Planícies de inundação indiferenciadas

Estruturas Fluviais
- Cordões marginais
- Bordas de terraços fluviais
- Paleocanais fluviais

DESCRIÇÃO SUCINTA DAS GEOFORMAS OU UNIDADES GEOMÓRFICAS:

Vale Fluvial: A delimitação do vale ocorreu através da identificação das quebras de relevo correspondentes ao contato entre geoformas da dinâmica fluvial, definidas como unidades geomórficas Terraços Fluviais e Planícies de Inundação, e as geoformas associadas aos processos morfodinâmicos das encostas rochosas. Estas, definidas como Embasamento Cristalino e Terraços Colúvio-Aluvionares, as quais limitam a expansão lateral do vale.

Embasamento Cristalino: Abrange formas de paisagem associadas aos metamorfitos e magmatitos, inclusive solos e saprólitos derivados, pertencentes às unidades litoestratigráficas Terreno Luís Alves e ao Grupo Itajaí. A unidade ocupa as encostas das serranias adjacentes ao vale; ocorre como inselbergs nas geoformas Terraços Colúvio-Aluvionares, Terraços Fluviais e Planícies de Inundação; e aflora em knickpoints nas margens e no leito do rio Itapocu.

Terraços Colúvio-Aluvionares: Geoformas desenvolvidas nas encostas e sopés das serranias, associadas a sedimentos silicáticos imaturos, mal selecionados e variegados, oriundos de múltiplas áreas fontes de detritos e pertencentes à unidade litoestratigráfica Coberturas Sedimentares do Cenozoico, foram enquadrados na unidade geomórfica. Esta, especificamente abrange sistemas de leques aluviais coalescentes e coluviões de movimentos gravitacionais de massa.

Terraços Fluviais: Abrange planícies de inundação abandonadas durante a evolução do rio, inclinadas em direção ao canal ativo na época de formação e dotadas de texturas e estruturas sedimentares reliquiares, oriundas da dinâmica fluvial pretérita. Engloba antigas barras fluviais, canais abandonados, dentre outras formas sedimentares e de relevo reliquiares, aplainadas por processos erosivos posteriores.

Planícies de Inundação: Estão associadas à dinâmica recente do rio. São áreas sujeitas a inundações periódicas e, relativamente, mais suscetíveis aos processos deposicionais e erosivos da dinâmica do canal fluvial. A unidade é dividida na subunidade Planícies de Inundação Indiferenciadas e subunidade Barras Fluviais. As Planícies de Inundação Indiferenciadas abrangem formas associadas a paleocanais, meandros abandonados e barras fluviais inativas, colmatadas e aplainadas, indivisíveis das geoformas circunvizinhas através de fotointerpretação. As Barras Fluviais correspondem a formas associadas a depósitos arenosos de canal, genericamente barras centrais e laterais, de pontal ou de meandro, abandonadas pela dinâmica do rio, incorporadas às Planícies de Inundação. As Barras Fluviais são reconhecíveis e divisíveis através da identificação dos Cordões Marginais.

Bordas de Terraços Fluviais: Os Terraços Fluviais situam-se em patamares altimétricos acima das planícies atuais, das quais estão separados por quebras acentuadas de relevo, oriundas de migrações laterais e incisões de canal, nomeadas bordas de terraço. Estas bordas normalmente estão aplainadas por erosão e deposição gravitacional de sedimentos nos sopés, com consequente suavização das bordas acentiladas.

Cordões Marginais: Estruturas lineares deposicionais e erosionais, associadas à formação de barras fluviais, subparalelas ao fluxo hídrico da época de formação da barra.

Canal Fluvial: Corresponde à calha normal do rio Itapocu (no mapa, também são apresentados pequenos trechos dos canais de alguns afluentes). No canal, o escoamento superficial é permanente, sendo ocupado tanto no advento de estiagens, como em períodos de cheias, quando ocasionalmente pode ocorrer o transbordamento de água para as Planícies de Inundação. A calha é limitada por quebras de relevo relacionadas às cristas das margens fluviais e, frequentemente, apresenta corpos sedimentares emersos que compõe barras. Estas, podem ocasionar a divisão do canal em braços múltiplos.

Barras Fluviais Ativas: Corpos predominantemente sedimentares existentes no canal fluvial ativo. Basicamente, abrangem barras centrais e laterais, de pontal ou de meandro ativas.

Notas Finais: Os mapas apresentados acima, correspondem a produtos de mapeamento indireto das geoformas associadas ao vale fluvial do Rio Itapocu, na área de estudo. O mapeamento consistiu na identificação, vetorização e fotointerpretação das formas do relevo ou da paisagem (geoformas). O procedimento fotointerpretativo consistiu na atribuição indireta de significado aos diferentes elementos estruturais e texturais identificados nas imagens e que compõe distintas geoformas. Finalmente, houve etapa de campo para o reconhecimento da área de estudos. Esta etapa consistiu no reconhecimento visual, com baixo nível detalhe, através de caminhamento. Desse modo, não foram aplicadas técnicas de mapeamento sistemático. Nesse sentido, este produto deve ser utilizado como um mapa base, de reconhecimento, que pode ser detalhado através de técnicas de campo, amostragem sistemática, de prospecção direta e indireta, além de métodos de mapeamento sistemático.

APÊNDICE III – RESUMO EXPANDIDO PUBLICADO NA CATEGORIA COMUNICAÇÃO DE PESQUISA NA REVISTA ESTRABÃO

Estrabão
Vol(2):170 - 179
©The Author(s) 2021
DOI: 10.53455/re.v2i.40

CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DE UM TRECHO DO RIO ITAPOCU, REGIÃO NORTE DE SANTA CATARINA: SUBSÍDIOS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO GEOMÓRFICO

Fábio Pinto[1], Débora Brentano[2,1] and Fernanda Simoni[2]

Abstract
Processos morfodinâmicos desenvolvidos em ambiente fluvial, estão relacionados a fatores naturais que propiciam alterações periódicas na paisagem e às litoestruturas preexistentes que controlam o substrato do vale fluvial. Os principais fatores naturais que propiciam as alterações, correspondem a atividade tectônica, capaz de alterar os padrões altimétricos do terreno, e a atividade climática, controladora do regime de precipitação. Por outro lado, a depender da composição e da configuração estrutural do substrato, este poderá controlar a mecânica evolutiva dos rios. Estudos de sensitividade fluvial, podem se restringir a análises encerradas em processos ou parâmetros particulares, com a finalidade de elucidar problemas específicos do ambiente. Por outro lado, podem possuir tendências generalistas, principalmente quando centrados na discussão dos efeitos sinergísticos dos processos que imputam alterações ao ambiente e dos controles naturais que proporcionam resistência e resiliência ao ambiente. Desse modo, o trabalho pretendido, visa analisar as interações entre chuvas e condicionantes do substrato na evolução da paisagem fluvial, através da integração de dados pluviométricos com dados geoespaciais, extraídos de mapeamento multitemporal das alterações morfológicas nas geoformas do vale fluvial.
Palavras-chave:

Keywords
morfologia fluvial, sensitividade de paisagem, cartografia temática.

INTRODUÇÃO

A sensitividade denota a paisagem como o produto de um conjunto de fenômenos que organizam e retrabalham as geoformas da paisagem, obedecendo às características do substrato (Fryirs, 2017) ou especificamente ao arcabouço litoestrutural de controle do terreno.

A análise da sensitividade, implica na avaliação da paisagem a partir da investigação dos seus limiares de estabilidade (geomorphic thresholds), propriamente da identificação dos fatores de modificação e dos controles geomórficos do terreno, permitindo a elaboração de modelos geoambientais fidedignos para o desenvolvimento da política ambiental, o planejamento da ocupação territorial, a melhoria da qualidade funcional do ambiente e, consequentemente, para a gestão ambiental e de riscos naturais (SCHUMM, 1979; SILVA & SILVA, 2016; FRYIRS, 2017) (Fryirs, 2017; Schumm, 1979).

Geoformas sedimentares associadas às paisagens fluviais, são especialmente sensíveis a quaisquer perturbações nas condicionantes ambientais do sistema (SCHUMM, 1979, 1993; HOLBROOK & SCHUMM, 1998;) (Crosby & Whipple, 2006). Condições de desequilíbrio, com alterações nos padrões de migração lateral, incisão, agradação e degradação sedimentar, e mudanças substanciais na paisagem fluvial, decorrem por influência de processos que podem provocar alterações nos níveis de base locais, ou fluviais, como aqueles associados ao clima (SCHUMM, 1979, 1993;) (Crosby & Whipple, 2006).

A precipitação é considerada o principal agente de modificação da paisagem sob controle do clima, com impacto direto no regime de escoamento superficial, sendo este, um dos mecanismos de modelação mais relevantes (GILBERT, 1877;) (Deal, Botter, & Braun, 2018; Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973). Entretanto, há uma disparidade na influência da precipitação na paisagem (Deal et al., 2018). Processos morfodinâmicos são influenciados pelo montante anual da precipitação, mas são os extremos episódicos que, em curtos períodos de tempo, afetam intensamente a paisagem (GILBERT, 1877; Basso, Frascati, Marani, Schirmer, & Botter, 2015; Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973).

Portanto e considerando que o reconhecimento da sensitividade, proporciona a identificação dos controles litoestruturais que imputam resistência geomórfica ao sistema; que a integração de dados relativos a esses controles, com dados de origem climática, como aqueles relativos a extremos de precipitação, auxilia na investigação dos limiares de estabilidade do ambiente; que um distúrbio que ultrapassa o limiar de estabilidade do ambiente, tem propensão para ocasionar alterações reais e duradouras, tanto no sentido de migração lateral, de incisão, ou alterações nas dimensões do canal fluvial; e, finalmente, que os resultados da análise de sensitividade, podem ser traduzidos em produtos de cartografia temática, úteis para a gestão e o planejamento territorial, o trabalho analisará as interações entre chuvas e condicionantes do substrato na evolução das paisagens fluviais.

[1] Mestrado Profissional em Clima e Meio Ambiente, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
[2] Instituto Federal de Santa Catarina, 3) Eng. Civil, Dra. Coorientadora
Emails: brentano@ifsc.edu.br (Débora Brentano), fernanda@ifsc.edu.br (Fernanda Simoni)

Corresponding author:
Fábio Pinto, Mestrado Profissional em Clima e Meio Ambiente, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
Email: fabiomacielpinto@gmail.com

Para tanto, utilizará como área de estudo, um trecho do rio Itapocu, situado entre os municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim e Araquari, no Estado de Santa Catarina. Nesse trecho, será determinada a sensitividade do ambiente fluvial ao desenvolvimento de processos morfodinâmicos capazes de ocasionar alterações morfológicas cartografáveis, nos padrões de estilo fluvial. Para isso, almeja-se caracterizar ajustes e alterações espaciais na morfologia do canal do rio; caracterizar litoestruturas associadas ao controle morfoestrutural do canal; analisar a relação entre episódios de extremos de precipitação e alterações espaciais na morfologia do canal. Ao final será elaborada carta de sensitividade ao desenvolvimento de processos de ajuste morfológico, ou migração do canal fluvial.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Gilbert (1877), identificou agentes de esculpimento e degradação da paisagem, elencando a chuva dentre os principais. Para Gilbert (1877), todos os processos de denudação são diretamente afetados pelo montante médio das chuvas ao longo do ano, sendo acelerados ou diminuídos pelas variações periódicas nas taxas de precipitação. Para os rios, os períodos em que a precipitação provoca eventos episódicos de cheias e inundações, são mais significativos para os processos de modelagem da paisagem fluvial do que períodos de monotonia, ou de chuvas bem distribuídas (GILBERT, 1877).

Scheidegger and Hydrogeomorphology (1973), em premissa semelhante, considera a água, o agente mais importante na modelagem da paisagem, causando alterações no equilíbrio das formas de relevo. A água de runoff ou de escoamento superficial, causaria os principais efeitos de modelação, afetando a estabilidade das encostas, parcialmente percolando no substrato, alimentando os aquíferos e, parcialmente, sendo capturada pelos rios (Deal et al., 2018; Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973).

Nos rios, eventos hidrológicos significantes que incrementam o fluxo hídrico por períodos curtos de tempo, são relativamente mais significativos para a modelagem da paisagem, ante as variações médias no montante da precipitação (GILBERT, 1877;) (Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973). Esses eventos estão diretamente associados à chuva dramaticamente concentrada que ocasiona o aumento da capacidade erosiva, ao ponto de proporcionar alterações morfológicas drásticas no sistema fluvial, causando destabilizações relativas ao rompimento de margens, além de enchentes (GILBERT, 1877;) (Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973).

Nesse sentido, Bower, Hannah, and Mcgregor (2004), estabeleceram equações que correlacionam fluxo hídrico, precipitação, temperatura do ar e as alimentaram com dados coletados durante 25 anos, relativos a esses parâmetros. Demonstraram que rios são sensíveis às variações nos padrões das chuvas e, enquanto não foi estabelecida relação clara entre temperatura do ar e fluxo hídrico (Bower et al., 2004).

Para Basso et al. (2015), a pluviosidade afeta os ambientes fluviais de maneira não linear, a depender do contexto climático, ao produzir regimes heterogêneos, ou monótonos de escoamento nos rios. Situações em que o contexto é propício à concentração de chuvas em determinados períodos, favorecem a erosão e o transporte clástico, sendo mais significativos para a evolução paisagem fluvial.

Desse modo, há uma disparidade ante a escala geológica do tempo na ação climática em diferentes paisagens pois, enquanto as taxas de chuva associadas ao ambiente fluvial, em horas ou dias, podem conduzir a respostas erosivas relevantes e registráveis, por outro lado, em outros ambientes da paisagem, uma resposta relevante sob as mesmas taxas, poderá levar séculos, ou milênios (Deal et al., 2018).

A influência de mudanças climáticas, igualmente, ocorrerá de maneira não linear, podendo impactar na disponibilidade de sedimentos, modificar os regimes de escoamento, reduzir ou ampliar a energia do

fluxo hídrico (Deal et al., 2018). Prudhomme et al. (2013a, 2013b), de maneira generalizada, consideram bacias hidrográficas sensíveis a mudanças climáticas. Ainda que cada bacia absorva e responda de forma particular aos impactos das mudanças, obedecendo às suas características físicas, respostas geomórficas a eventos extremos, ocasionados por alterações nos padrões do clima, podem ocorrer em período, relativamente, curto (2 a 20 anos).

Nesse contexto, cenários de mudanças climáticas com aumento na concentração de CO2 e aerossóis de sulfato na atmosfera, são especialmente preocupantes quanto ao impacto nas bacias e rede hidrográfica. A depender do contexto, essas condições podem ocasionar aumento nas taxas de precipitação e no volume de água transportada nos rios, com alterações temporais nos períodos de ocorrência de inundações e de pico de inundações (Jha, Arnold, Gassman, Giorgi, & Gu, 2006; Simonovic & Li, 2004).

Para N Notebaert and Verstraeten (2010), em análise de escala geocronológica, os efeitos de variações nos padrões climáticos em ambientes fluviais são claros. Dados estratigráficos, radiométricos e paleoclimáticos, extraídos de amostras de sedimentos de planícies fluviais da região central e leste da Europa, denotam clara relação entre alterações nos padrões de deposição aluvial e mudanças no clima ocorridas ao longo do Holoceno, com mudanças no clima impactando diretamente nos padrões de escoamento e deposição dos rios (Notebaert & Verstraeten, 2010).

METODOLOGIA

A metodologia se baseia na integração de dados morfoestruturais e pluviométricos, estes visando a identificação de episódios de extremos para incorporação na análise da sensitividade. Uma vez identificados os episódios.

Imagens de satélite serão utilizadas para caracterizar a rede fluvial em período diretamente associado aos eventos pluviométricos identificados. A partir das imagens serão obtidos dados geoespaciais (mapeamentos das margens fluviais e geoformas de fundo de vale para diferentes datas), buscando-se a identificação de possíveis alterações ocorridas após a ocorrência de eventos extremos.

ÁREA DE ESTUDO

Para mapear a sensitividade do canal fluvial, adotou-se uma área de estudos corresponde a um trecho do rio Itapocu, localizado em Santa Catarina, entre os Municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim e Araquari (Figura 1). O trecho abrange a um segmento longitudinal do rio, com cerca de 52,3 km, limitado na montante pela confluência dos rios Novo e Humboldt (UTM 675.832 E / 7.075.311 S) e na jusante pela desembocadura do rio Putanga (UTM 712.028 E / 7.063.098 S).

EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS

Dados horários brutos, sem correção de falhas, foram extraídos de pluviômetros automáticos da rede observacional do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (www2.cemaden.gov.br). Os dados foram obtidos para os municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim e Araquari/SC, abrangendo o período entre 01/01/2016 e 31/08/2021 (2070 dias). Em seguida, houve a seleção primária das estações ativas, preferenciando-se aquelas situadas a uma distância de até 250 m da área de estudo. Ou seja, aproximadamente instaladas no vale fluvial e consideradas representativas para eventos incidentes na área. As estações selecionadas foram: João Tozini

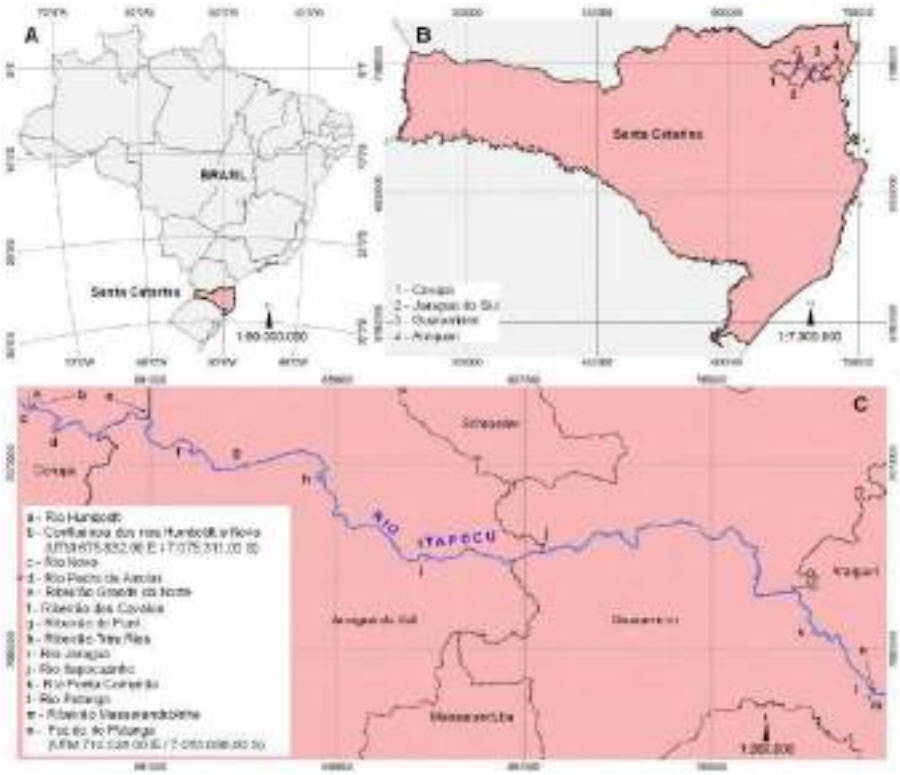


Figure 1. – Croqui de localização da área de estudo e de identificação de hidrônimos para referência situacional. Fonte de dados geoespaciais brutos: SDE (2015), IBGE (2020).

– 420450903A, situada em Corupá; Bombeiro do Centro – 420890601A e SAMAE Ilha da Figueira – 420890606A, situadas em Jaraguá do Sul; e Bananal – 420650403A, situada em Guaramirim.

Essas estações apresentaram, respectivamente e aproximadamente 2,5%; 0,8%; 2%; e 0,5% de falhas nos dados brutos do período. Desse modo, os eventos selecionados para análise, foram extraídos apartir da estação com menor quantidade de falhas (420650403A – Bananal). Foram obtidas as frequências acumuladas diárias (24h) para a estação e elencadas aquelas superiores a 100mm, correspondentes aos dias 07/02/2020 (126,8mm), 19/05/2017 (119,8mm), 18/02/2019 (112,2mm), 22/05/2016 (108mm), 27/11/2020 (104,8mm) e 27/02/2021 (101mm).

MAPEAMENTO MORFOESCULTURAL

Os procedimentos serão desenvolvidos em ambiente GIS – QGIS3.20. O mapeamento será iniciado com o delineamento e classificação dos limites do fundo do vale, os quais restringem a evolução lateral do canal fluvial. Essa etapa será realizada através de fotointerpretação (Arcanjo & Fotogeologia, 2011; Guy, 1966; Soares & Fiori, 1976) e vetorização das margens, com o uso de Modelos Digitais de Terreno (MDT), resolução espacial (r.e.) 1 m, do levantamento aerofotogramétrico de Santa Catarina, disponíveis na plataforma SIGSC (sig.sc.gov.br). Os MDTs serão renderizados em modelo de relevo sombreado de altitude 45º, azimute 315º e fator Z de 3 m.

Nas etapas de mapeamento multitemporal, dados geoespaciais serão extraídos de imagens multiespectrais, Level-1C, sensores MSI (Multispectral Instrument) da missão Sentinel-2. As imagens selecionadas, correspondem a cenas disponíveis nas plataformas Copernicus Open Acess Hub (scihub.copernicus.eu) e EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov), capturadas antes e depois dos eventos selecionados: 18/02/2019 (datas das imagens: 30/01 e 15/04/2019), 27/11/2020 (datas: 15/11 e 30/12/2020) e 27/02/2021 (datas: 23/02 e 10/03/2021).

A partir das imagens, serão realizadas classificações morfológicas multitemporiais e de estilos do canal ao longo do período de estudo, as quais seguirão as etapas: a) realce do canal através do índice da diferença normalizada da água de Mcfeeters (1996) [NDWI=B3(GREEN)-B8(NIR)/B3(GREEN)+B8(NIR)]; b) fotointerpretação (Arcanjo & Fotogeologia, 2011; Guy, 1966; Soares & Fiori, 1976) e vetorização; c) segmentação do canal em zonas com padrões morfológicos homólogos (Arcanjo & Fotogeologia, 2011); d) caracterização morfológica e morfométrica do canal (Brierley & Fryirs, 2005; Fryirs, Wheaton, & Brierley, 2016; Rinaldi, Gurnell, Tánago, Bussettini, & Hendriks, 2016).

Finalmente, haverá a delimitação das geoformas, a qual visa a subdivisão do terreno em unidades morfológicas e a extração de informações multitemporais sobre a evolução espacial dessas unidades ao longo do período de estudo. Esse procedimento ocorrerá a partir do realce das geoformas através de razões de bandas, r.e. 10 e 20 m, conforme Miranda, Duarte, Gomes, Souza, and Neto (2019), [B8(NIR)/B12(SWIR2)] e [B8a(VNIR)/B12(SWIR)], seguido de fotointerpretação, vetorização e classificação das geoformas de acordo com suas características morfológicas e estruturais, conforme convenções de IBGE (1998, 2009).

A partir da identificação de ocorrências, ou não, de alterações morfológicas no canal fluvial ao longo do período, após os eventos selecionados, será elaborado produto cartográfico final. Esse produto corresponderá a um mapa de sensitividade do ambiente fluvial, abrangendo a área de estudo, em escala de detalhe a semidetalhe. O mapa identificará as geoformas existentes no fundo do vale fluvial, o canal atual do rio e os trechos do rio e do vale sensíveis a alterações morfológicas balizadas pelo padrão dos eventos pluviométricos selecionados. Desse modo, o produto demonstrará os trechos sensíveis a alterações, tendo em vista a ocorrência de determinados fenômenos pluviométricos (com determinada intensidade e duração).

REFERÊNCIAS

Arcanjo, J. B. A., & Fotogeologia. (2011).

Barros, A. C. M., Souza, J. O. P., & Correa, A. C. B. (2010). *Sensitividade da paisagem na bacia do riacho do mulungu*. Belém de São Francisco, Pernambuco.

Basso, S., Frascati, A., Marani, M., Schirmer, M., & Botter, G. (2015). Climatic and landscape controls on effective discharge. *Geophysical Research Letters*, *42*, 8441-8447.

Bower, D., Hannah, D. M., & Mcgregor, G. R. (2004). (Vol. 18).

Brierley, G. J., & Fryirs, K. A. (2005). *Geomorphology and river management: Applications of the river styles framework*. Oxford, UK: Blackwell Publishing.

Brunsden, D., & Thornes, J. B. (1979).

Crosby, B. T., & Whipple, K. X. (2006). *Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the*. Waipaoa River, North Island, New Zealand. Geomorphology.

Deal, E., Botter, G., & Braun, J. (2018). Understanding the role of rainfall and hydrology in determining fluvial erosion efficiency. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*(123), 744-778.

Estatística, I. I. B. D. G. E. (n.d.). Retrieved from <https://www.ibge.gov.br/>

Estatística, I. I. B. D. G. E. (1998).

Fryirs, K. A. (2017). River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, *42*, 55-70.

Fryirs, K. A., Wheaton, J. M., & Brierley, G. J. (2016).

Gilbert, G. K. (n.d.).

Guy, M. (1966). Quelques principes e quelques experiences sur la methodologie de la photo-interpretation. In *Symposium International de Photo-Interpretation (SIPI)* (Vol. 2, p. 21-41).

Holbrook, J., & Schumm, S. A. (1999).

(n.d.). Retrieved from <http://sigsc.sc.gov.br/>

Jha, M., Arnold, J. G., Gassman, P. W., Giorgi, F., & Gu, R. R. (2006). Climate change sensitivity assessment on Upper Mississippi river basin streamflows usin SWAT. *Journal of the american water resources association*(4), 997-1015.

Mcfeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*(7), 1425-1432.

Miranda, M. P., Duarte, C. R., Gomes, D. D. M., Souza, C. D., & Neto, C. A. S. (2019). *Análise comparativa de imagens sentinel 2a (msi) e landsat-8 (oli) aplicadas ao mapeamento geológico, região de itataia*. Santa Quitéria, CE.

Notebaert, B., & Verstraeten, G. (2010). Sensitivity of west and central european river systems to environmental changes during the Holocen: a review. *Earth-Science Reviews*(103), 163-182.

Prudhomme, C., Crooks, S., Kay, A. L., & Reunard, N. (2013a). Climate change and river flooding: parte 1 classifying the sensitivity of British catchments. *Climatic Change*, *119*, 933-948.

Prudhomme, C., Crooks, S., Kay, A. L., & Reunard, N. (2013b). Climate change and river flooding: parte 2 sensitivity characterisation for british catchments and example vulnerability assessments. *Climatic Change*, *119*, 949-964.

Rinaldi, M., Gurnell, A. M., Tánago, M., Bussettini, M., & Hendriks, D. (2016). Classification of river morphology and hydrology to support management and restoration. *Aquatic Sciences*, *78*, 17-33.

Scheidegger, A. E., & Hydrogeomorphology. (1973). *Journal of Hydrology*, *20*, 193-215.

Schumm, S. A. (1979).

Schumm, S. A. (1993). River response to baselevel change: implication for sequence stratigraphy. *The Journal of Geology*, *101*(2), 279-294.
Simonovic, S. P., & Li, L. (2004). (Vol. 18).
Soares, P. C., & Fiori, A. P. (1976).

Author Biographies

Fábio Pinto Discente do Mestrado Profissional em Clima e Ambiente

Débora Brentano Orientadora**,** docente do Instituto Federal de Santa Catarina e do Mestrado Profissional em Clima e Ambiente.

Débora Brentano Co-orientadora e docente do Instituto Federal de Santa Catarina.

APÊNDICE IV – ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA *RESOURCES, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY*

Resources, Environment and Sustainability 13 (2023) 100124

Contents lists available at ScienceDirect

Resources, Environment and Sustainability

journal homepage: www.elsevier.com/locate/resenv

Extreme precipitation events and geomorphic adjustments in the riverscape: A case study in Southern Brazil

Fábio Maciel Pinto *, Fernanda Simoni Schuch, Débora Monteiro Brentano

Federal Institute of Education Science and Technology of Santa Catarina (IFSC), Graduate Program in Climate and Environment (PCAM), Florianópolis 88020-300, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Climate changes
Geomorphometry
Fluvial system
Landscape geomorphology
Remote sensing
Catchment

ABSTRACT

Extreme precipitation events can cause geomorphic adjustments in the riverscapes. As a result of the increase in severity and frequency of these events in climate change scenarios, riverscapes may become more sensitive to the geoforms sculpting processes. Consequently, communities in the river valleys may be adversely affected, worsening socio-environmental problems arising from these places' occupation. This work investigates the relationship between events classified as heavy rainfall and persistent rainfall and geomorphic adjustments in the riverscape. A section of the Itapocu River in southern Brazil between latitudes 26°25'S and 26°32'S was used as a case study. Extreme events recorded in pluviometers' historical series located around the study area were selected and characterized. These events occurred between 01/30/2019 and 04/15/2019; 11/15/2020 and 12/30/2020; 02/23/2021 and 03/10/2021. The geomorphic adjustments were identified by selecting Sentinel-2 orbital imagery. The satellite images were applied in the river valley geoforms vectorization and correlation among transverse and longitudinal sections to the river valley. The analysis of fluvial sensitivity went through the adjustments' significance evaluation by the Wilcoxon Signed Rank Test. The results indicated that the river presented adjustments related to extreme precipitation events. These adjustments were identified as channel migration, channel expansion, channel narrowing, river bar expansion, and river bar narrowing. However, only channel migration, channel expansion, and channel narrowing were significant. In 2019, 82.03% of the river was significantly affected by the events, while in 2020 and 2021, events impacted 57.67% and 64.72% of the river, respectively.

1. Introduction

Geomorphological systems are continually subject to perturbations. These disturbances may result from natural phenomena that, in a spatially complex and transient manner, affect the landscape geoforms causing environment instabilities and the migration to a new state of relative morphological stability (Brunsden and Thornes, 1979).

The concept of sensitivity expresses the relationship between controls that attribute resistance and resilience to the landscape and the distribution of events capable of causing disturbances in the geoforms (Brunsden and Thornes, 1979; Schumm, 1979; Fryirs, 2017). Thus, it analyzes landscapes from the geomorphic threshold and modification factors. Sensitivity denotes the landscape as the dynamic result of sculpting agents and relief controls over time in geographic space.

For environmental management purposes, sensitivity may determine the impact of the disturbance events on the landscape (Downs and Gregory, 1995). Understanding the implications of the events provides key conceptual information to underpin environmental management practices, especially in the management and assessment of environmental impacts on water resources (Reid and Brierley, 2015). These resources are under increasing pressure from human activities and climate change (Prudhomme et al., 2013a,b; Brierley et al., 2019; Pinto et al., 2021).

The riverscapes are sensitive to geomorphic adjustments, mainly because the river morphology is determined by the interaction between the transfer of water and sediment at different temporal scales, according to the magnitude of the disturbance events (Deal et al., 2018; Llena et al., 2020). These adjustments are associated with alterations in the runoff regime, which controls channel migration, incision, avulsion, aggradation, sedimentary degradation processes, and may cause permanent changes in the riverscape (Schumm, 1979, 1993; Holbrook and Schumm, 1999; Crosby and Whipple, 2006).

As a primary water source, atmospheric precipitation is vital for runoff and relief modeling (Scheidegger, 1973; Deal et al., 2018). However, the influence varies according to the rainfall regime, with well-distributed precipitation producing constancy in the water flow and slow riverscape modeling, while extreme events generate high-energy flows that quickly expand the erosion capacity of rivers and may

* Corresponding author.
E-mail addresses: fabiomacielpinto@gmail.com (F.M. Pinto), fernandass@ifsc.edu.br (F.S. Schuch), brentano@ifsc.edu.br (D.M. Brentano).

https://doi.org/10.1016/j.resenv.2023.100124
Received 14 February 2023; Received in revised form 2 May 2023; Accepted 11 May 2023
Available online 22 May 2023
2666-9161/© 2023 The Author(s). Published by Elsevier B.V. on behalf of Lishui Institute of Ecology and Environment, Nanjing University. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

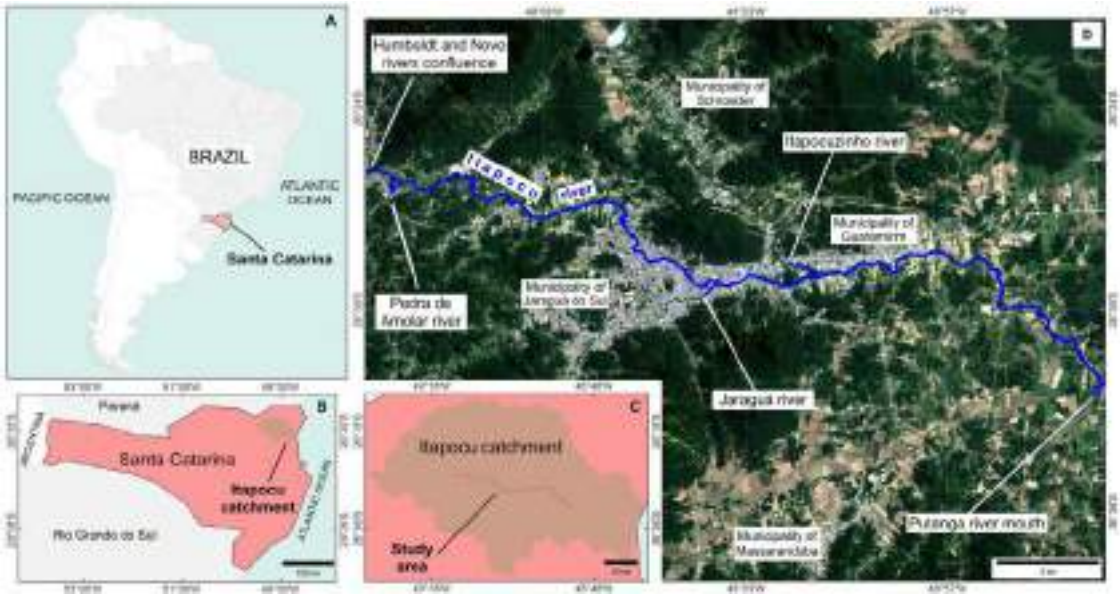


Fig. 1. Location sketch of Santa Catarina (A), Itapocu Catchment (B), study area (C), and RGB composition of Sentinel-2 imagery detailing hydronyms and nearby cities (D).

unbalance the riverscape (Scheidegger, 1973; Vandenberghe, 2003; Buraas et al., 2014; Basso et al., 2015; Deal et al., 2018). Therefore, the leading causes of modification of the riverscape geoforms correspond to transient extreme environmental events, among which are the extreme variations in weather conditions.

Fluvial sensitivity assesses the adjustment potential of a river through the phenomena capable of destabilizing the riverscape, identifying sensitive places that may result in adverse socio-environmental effects, and enabling actions against them (Fryirs, 2017; Kleina and Santos, 2017; Pinto, 2020; Pinto and Weber, 2021). That assessment becomes important because rivers are sensitive to climate change processes but are variably affected according to the physiographic characteristics and the climate context of the riverscapes (Prudhomme et al., 2013a,b).

Projections indicate that the increase in global average temperature is accompanied by an intensification of processes related to the water cycle, including a higher seasonal and interannual variability in precipitation and runoff (IPCC, 2021). In southeast South America, between 1950 and 2020, a progressive temperature increase contributed to a rise in extreme precipitation events frequency (Grimm, 2011; Nunes and Silva, 2013; IPCC, 2021). With a progressively higher incidence of phenomena capable of modifying the riverscapes, rivers will become more sensitive and then be adjusted to new precipitation scenarios.

Evaluating the riverscapes from their modification factors allows the development of geoenvironmental models for territorial, environmental, and natural disaster governance (Silva and Silva, 2016; Fryirs, 2017). Therefore, this study presents the methodological bases and results by analyzing the extreme precipitation events' influence on the riverscape. The objective was to identify the geomorphic adjustments produced by extreme events by integrating pluviometric data for the events' characterization and multitemporal geomorphometric data associated with riverscape.

The paper demonstrates the changes, associated with extreme precipitation events, suffered by the riverscape through methodological procedures that are easily reproducible and adaptable to other environmental contexts. Thus, the document corresponds to a case study that aims to collaborate with improving the sensitivity assessment methodologies, mainly given the worrying scenario of the current climate change and its negative impacts on the fluvial environment.

2. Methods

This section describes the correlation procedures among extreme events, geomorphometric data, and the evaluation of fluvial sensitivity. Statistical methods were performed in the PAST 4.11 software (Hammer et al., 2001). QGIS 3.20 was used to vectorize and measure riverscape geoforms. Along with QGIS, GrADS 2.2.1 was used to spatialize the events.

2.1. Study area

The study area corresponds to a section of the Itapocu River between coordinates 26°25'S / 49°14'W and 26°32'S / 48°52'W. The area is located in the homonymous catchment, in the State of Santa Catarina, in the South Region of Brazil (Fig. 1). It is delimited to the west by the Humbolt and Novo Rivers and to the east by the Putanga River.

The region has a history of natural disasters associated with extreme precipitation events, especially in the summer (Nunes and Silva, 2013; Cardoso et al., 2020). In this season, monthly precipitation reaches 470 mm and fluvial discharge goes up to 188.5 $m^3\ s^{-1}$, while in the winter, monthly rainfall gets 140 mm and fluvial discharge 101.2 $m^3\ s^{-1}$ (Coan et al., 2014; Oliveira et al., 2018).

2.2. Extreme precipitation events

Selected extreme events occurred between 01/30/2019 and 04/15/2019, 11/15/2020 and 12/30/2020, 02/23/2021 and 03/10/2021. Pluviometric data were extracted from the following pluviometers' historical series (from 01/01/2016 to 06/30/2022): 420450903A, 420890601A, 420890603A, 420890606A, 420890607A, 420650403A, 420130701A, and 421060501A. These pluviometers are operated by the National Center for Monitoring and Early Warning Natural Disasters (CEMADEN) (Fig. 2).

From the daily accumulated frequencies of precipitation's historical series, extreme events were classified into heavy rainfall (HR) and persistent rainfall (PR). HR occurs when the daily precipitation value is greater than or equal to the 99th percentile, according to Eq. (1), while PR happens when precipitation is greater than 1 mm in three consecutive days and the three-day moving average (MA) is greater

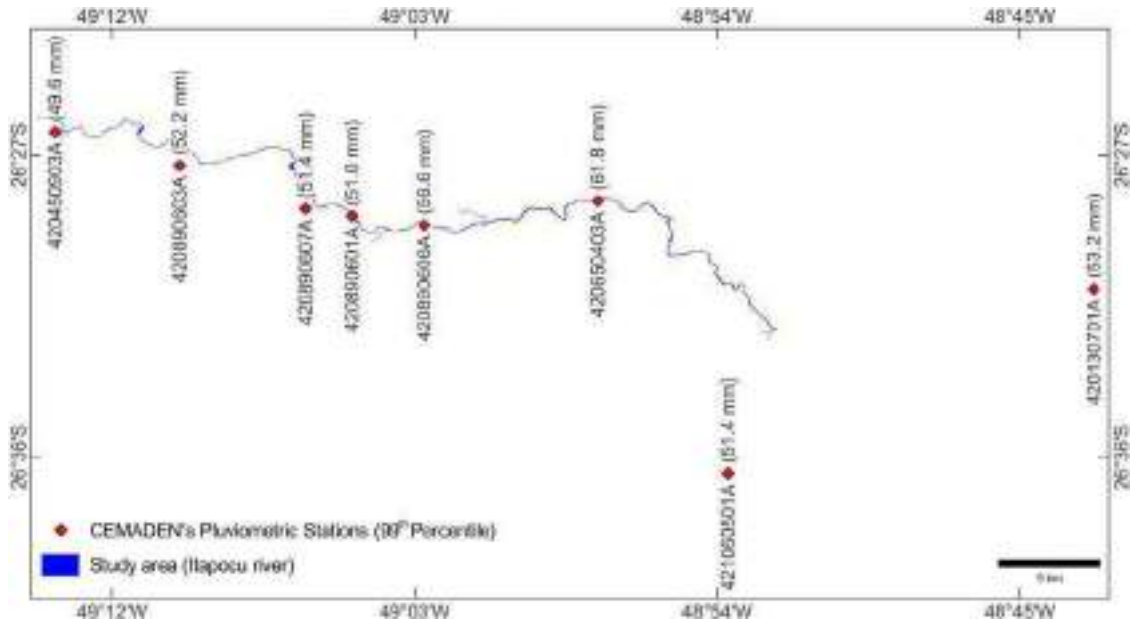


Fig. 2. Pluviometric stations and the respective 99th percentiles obtained from the daily accumulated frequencies of precipitation's historical series (01/01/2016 to 06/30/2022).

than or equal to the 99th percentile, as reported by Eq. (2) (Cardoso et al., 2020).

$$HR = P_d \geq q_n\left(0.99P_d\right) \tag{1}$$

$$PR = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n=3} P_{d(t-n-1)} \geq q_n\left(0.99P_d\right) \tag{2}$$

P_d is the recorded precipitation and q_n $(0.99P_d)$ is the 99th percentile of the historical series.

Ordinary kriging was applied to accumulated frequencies to spatialize events in the study area (Arnon, 1990; Bostan et al., 2012; Charles et al., 2022). Data from MERGE precipitation product, with temporal resolution (TR) of 30' and spatial resolution (SR) of 0.1°, were used to spatialize the events in the catchment (Rozante et al., 2010).

2.3. Geomorphometric procedures

Sentinel-2 bands, provided by European Space Agency (ESA) from 01/30/2019, 04/15/2019, 11/15/2020, 12/30/2020, 02/23/2021 and 03/10/2021 were combined through the Normalized Difference Water Index (NDWI). This index was proposed by McFeeters (1996), according to Eq. (3).

$$NDWI = \frac{B3\,(GREEN) - B8\,(NIR)}{B3\,(GREEN) + B8\,(NIR)} \tag{3}$$

B3 corresponds to the wavelengths from 0.52 to 0.59 μm (green), and B8 from 0.77 to 0.89 μm (near-infrared).

The bands have a spatial resolution (SR) of 10 m and a temporal resolution (TR) of 5 days for the constellation and 10 days for each satellite.

Raster data obtained (SR 10 m) were applied in the riverscape geoforms vectorization. These corresponded to the active river channel, active river bars, and river valley margins. Furthermore, the riverscape was segmented into morphological zones considering changes in the direction and width patterns of the geoforms resulting from landscape anomalies. Vectorization corresponds to the conversion of terrain features identifiable in images, into geometric objects that software can manipulate. Therefore, it transforms a terrain feature into a vector, producing an object that can be applied in geomorphometry.

Identification of adjustments was based on the geomorphometry of these vectorized geoforms and the classification by Brierley and Fryirs (2005) and Fryirs et al. (2009).

Specifically, the geomorphometric data obtained were compared through the temporal relationship between A and B dates, corresponding to 01/30/2019 and 04/15/2019, 11/15/2020 and 12/30/2020, 02/23/2021, and 03/10/2021. Longitudinal sections (LS) were delineated at the mean distance between river margins. Moreover, transverse sections (TS) to the LS and to the river valley were delineated at 100 m intervals. Variations in the width of the channel and bars were measured through Eq. (4). The LS' lateral displacements were measured by considering the river valley margins as fixed over time and subdividing the TS of the valley at the LS intersections. The half-transverse sections to the left (TSl) and right (TSr) of the channel were applied in Eq. (5).

$$G = TS\ B_{0+000} - TS\ A_{0+000} \tag{4}$$

G is the geomorphic adjustment of expansion or narrowing of a riverscape geoform; TS B_{0+000} and TS A_{0+000} are the transverse section measurements for dates B and A.

$$CM = TSh\ B_{0+000} - TSh\ A_{0+000} \tag{5}$$

CM is the geomorphic adjustment of channel migration; TSh B_{0+000} and TSh A_{0+000} are the half-transverse section measurements for dates B and A.

Positive values resulting from Eq. (4) denote the width expansion of the geoform. These geomorphic adjustments were identified as channel expansion (CE) and river bar expansion (BE). CE is the enlargement of the river in response to the dominance of erosive processes on one or both fluvial margins, while BE corresponds to the formation of new bars or the expansion or enlargement of the preexisting ones (Brierley and Fryirs, 2005; Fryirs et al., 2009).

Negative values resulting from Eq. (4) denote the narrowing of the geoform. These geomorphic adjustments were identified as channel narrowing (CN) and river bar narrowing (BN). CN is the shortening in width of the river in response to the imbalance between sediment influx and river erosion processes on one or both fluvial margins, while BN denotes the disappearance and decrease of a bar caused by the erosion (Brierley and Fryirs, 2005; Fryirs et al., 2009) or the stabilization and incorporation of the bar to the floodplains.

In the TSl case, Eq. (5) positive values denote channel migration (CM) to the right of the LS, while negative designate the CM to the left. This relationship is inverse for TSr. CM evaluated through Eq. (5) represents the measurement of a line coincident with TS of A and

Table 1
Heavy rainfall (HR) and Persistent rainfall (PR) events.

Period	Stations	99th Percentile (mm)	Rainy days	HR	Rainfall peak (mm)	PR period	PR period Accumulated precipitation (mm)
1/30/2019 to 4/15/2019	420890607A	51.4	2/11/2019 to 2/23/2019	2/17/2019	55.6	2/15/2019 to 2/19/2019	198.6
	420890601A	51.0			55.6	2/15/2019 to 2/19/2019	194.8
	420890606A	56.6			61.2	2/15/2019 to 2/19/2019	236.8
	420650403A	61.8			88.4	2/15/2019 to 2/19/2019	288.4
	420130701A	53.2			134.8	2/15/2019 to 2/19/2019	291.6
	420890607A	51.4	2/11/2019 to 2/23/2019	2/18/2019	83.8	2/15/2019 to 2/19/2019	198.6
	420890601A	51.0			91.4	2/15/2019 to 2/19/2019	194.8
	420890606A	56.6			118.2	2/15/2019 to 2/19/2019	236.8
	420650403A	61.8			112.2	2/15/2019 to 2/19/2019	288.4
	420130701A	53.2			96.2	2/15/2019 to 2/19/2019	291.6
	420450903A	49.6	4/4/2019 to 4/10/2019	4/7/2019	56.0		
	420890603A	52.2			55.0		
	420890601A	51.0			52.4		
11/15/2020 to 12/30/2020	420890603A	52.2	11/27/2020 to 12/30/2021	11/27/2020	98.0		
	420890607A	51.4			89.6		
	420890601A	51.0			69.2		
	420890606A	56.6			73.0		
	420650403A	61.8			104.8		
	420450903A	49.6		12/5/2020	62.4		
	420130701A	53.2			56.6		
	421060501A	51.4		12/6/2020	60.8		
	420450903A	49.6		12/12/2020	75.4		
	420450903A	49.6		12/29/2020	49.6		
2/23/2021 to 3/10/2021	420450903A	49.6	2/23/2021 to 3/6/2021	2/27/2021	106.4	2/26/2021 to 3/1/2021	221.6
	420890603A	52.2			106.4	2/26/2021 to 3/1/2021	256.2
	420890607A	51.4			104.0	2/26/2021 to 3/1/2021	202.4
	420890601A	51.0			97.4	2/26/2021 to 3/1/2021	177.8
	420890606A	56.6			112.6	2/26/2021 to 3/1/2021	210.8
	420650403A	61.8			101.0	2/26/2021 to 3/1/2021	226.0
	420450903A	49.6		2/28/2021	56.0	2/26/2021 to 3/1/2021	221.6
	420450903A	49.6		3/1/2021	52.0	2/26/2021 to 3/1/2021	221.6
	420890603A	52.2			98.4	2/26/2021 to 3/1/2021	256.2
	420890607A	51.4			51.0	2/26/2021 to 3/1/2021	202.4
	420650403A	61.8			87.8	2/26/2021 to 3/1/2021	226.0
	421060501A	51.4			59.8		
	420450903A	49.6		3/3/2021	75.4		

B, limited by the intersections between the LS and TS of the dates. In the half-transverse sections correlation process, the valley margins were considered relatively unchanged by the extreme events since the objective was to analyze the adjustments in the active river geoforms (active channel and active bars) exclusively.

CM is the river's lateral displacement on the valley floor (Brierley and Fryirs, 2005) toward one of the fluvial margins, causing the channel's position modification concerning the valley margins. These margins restrict the lateral evolution of the river in the valley and correspond to the contact between the fluvial sediments deposited on the valley floor, the adjacent rocky hillslopes, and the sedimentary deposits related to the morphodynamic processes of the slopes (Wheaton et al., 2015).

Moreover, considering that SR reduces the positional accuracy of the geoforms, a 10 m tolerance was established for validating the results. This tolerance pattern is associated with the SR of 10 m of the Sentinel-2 bands (B3 and B8) applied in the methodological procedures.

2.4. Sensitivity analysis

The significance analysis evaluated discrepancies among geomorphometric data of each morphological zone. Discrepancy (alternative hypothesis) represents the anomalies with meaning for sensitivity, indicating that the zone is sensitive. The null hypothesis suggests resilience that implies non-significant adjustments, conferring stability to the riverscape.

Geomorphometric data of A were paired with those of B because they refer to the same environment, with a temporal lapse. The Wilcoxon Signed Rank Test (Wilcoxon, 1945) was applied to the A–B pairs data grouped in the morphological zones, exclusively to the zones associated with geoforms that registered adjustments.

Thus, p *values* < 0.05 were considered significant (Hammer et al., 2001; Hajdukiewicz et al., 2016). Accordingly, zones with these results were deemed Sensitive to the events. Those with insignificant results (p *values* > 0.05) were classified as Stable; the adjustments were insufficient to destabilize the riverscape. The zones with no registered adjustments and whose data were not evaluated using the Wilcoxon Signed Rank Test were considered Insensitive.

3. Results

3.1. Characteristics of the extreme precipitation events

Different thresholds of extreme events were observed for each pluviometric station, denoting variations in the spatial distribution of the precipitation according to the historical series. The 99th percentile of the observations ranged from 49.6 mm in the valley upstream to 61.8 mm downstream (Fig. 2, Table 1).

Between 01/30/2019 and 04/15/2019, HR events took place on 02/17/2019, 02/18/2019, and 04/07/2019, with rainfall peaks recorded in the stations 420130701A (134.8 mm), 420890606A (118.2 mm), and 420450903A (56.0 mm) (Table 1). HR events of 02/17/2019 and 02/18/2019 caused the MA to increase above the 99th percentile thresholds and resulted in PR between 02/15/2019 and 02/19/2019, with 291.6 mm accumulated.

From 11/15/2020 to 12/30/2020, HR occurred on 11/27/2020, 12/05/2020, 12/06/2020, 12/12/2020, and 12/29/2020, with peaks recorded in the stations 420650403A (104.8 mm), 420450903A (62.4

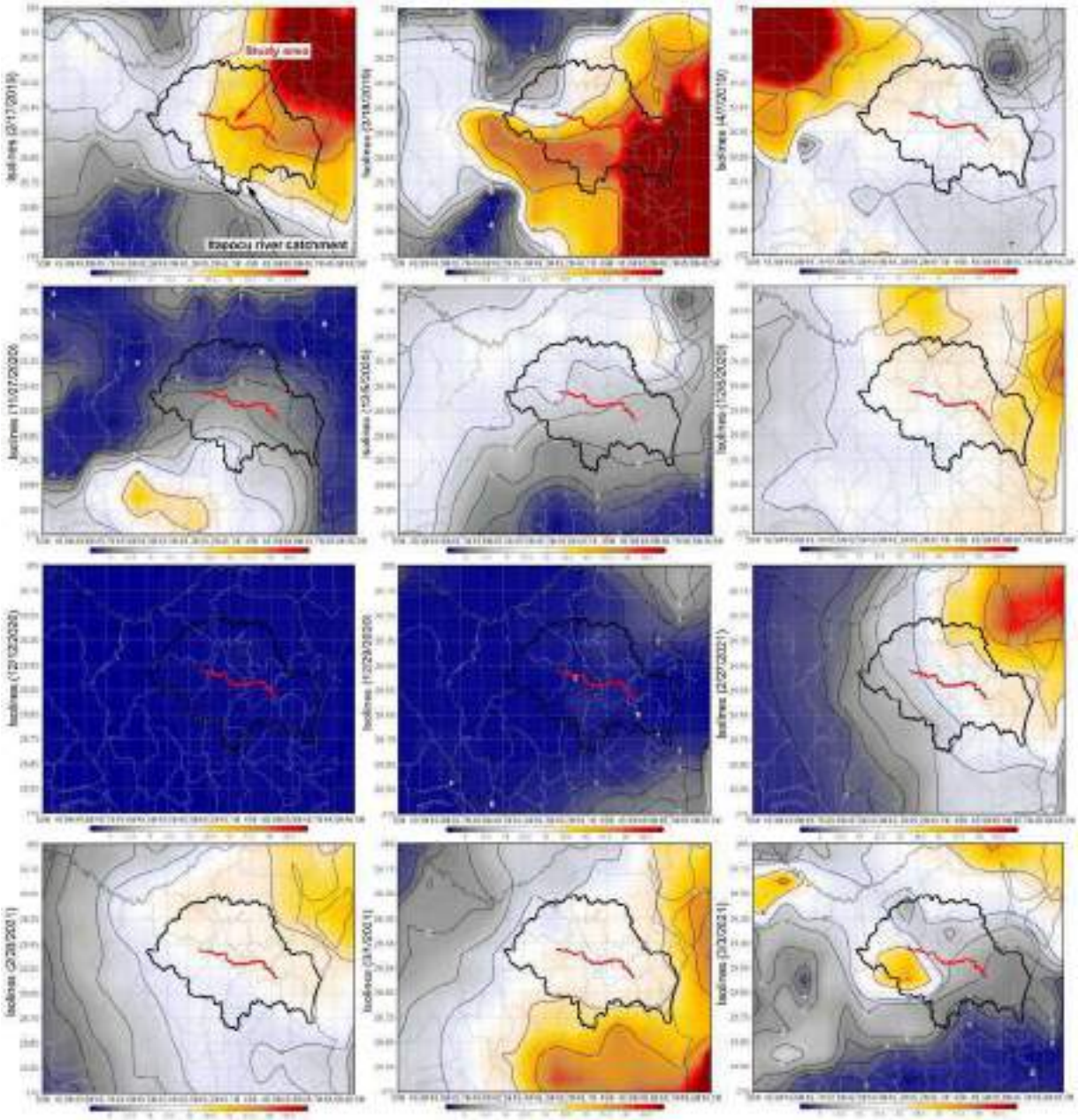


Fig. 3. Precipitation distribution in the Itapocu catchment during Heavy Rainfall (HR) events. Maps created from MERGE data.

mm), 421060501A (60.8 mm), 420450903A (75.4 mm), and 420450903A (49.6 mm).

Between 02/23/2021 and 03/10/2021, HR happened on 02/27/2021, 02/28/2021, 03/01/2021, and 03/03/2021, with peaks in the stations 420890606A (112.6 mm), 420450903A (56.0 mm), 420890603A (98.4 mm), and 420450903A (75.4 mm). HR events of 02/27/2021, 02/28/2021, and 03/01/2021 caused PR between 02/26/2021 and 03/01/2021, accumulating 256.2 mm.

3.2. Spatial distribution of the events and relationship with the adjustments in the riverscape

Precipitation distribution maps obtained by MERGE data denote that rainfall reached the entire catchment and zones on the days HR occurred. However, these extreme events did not extend to the entire catchment (Fig. 3).

Initially, the river valley was subdivided into 52 morphological zones (from Z1 to Z52) (Fig. 4). Then, by ordinary kriging interpolation, it was observed that between 01/30/2019 and 04/15/2019, extreme precipitation events (HR and PR) reached the zones from Z7 to Z52 (02/17/2019), Z1 to Z52 (02/18/2019), and Z1 to Z28 (04/07/2019) (Fig. 5). At that time, the river was about 52,500 meters long and the affected zones represented, respectively, 48,810 m (92,97%), 52,500 m (100.00%), and 22,850 m (43.52%) of the channel.

Between 11/15/2020 and 12/30/2020, HR and PR events impacted from Z1 to Z49 (11/27/2020), Z1 to Z15 (12/05/2020), Z1 to Z8 (12/12/2020), and Z1 to Z4 (12/29/2020). The 12/06/2020 event influenced regions downstream Z52, not affecting the study area. Considering that the average river extension was 52,500 m, at the time the impacted zones represented respectively 49,090 m (93.50%), 10,700 m (20.38%), 5390 m (10.26%), and 2370 m (4.51%).

From 02/23/2021 to 03/10/2021, HR and PR events reached from Z1 to Z52 (02/27/2021), Z1 to Z5 (02/28/2021), Z1 to Z52 (03/01/2021), and Z1 to Z7 (03/03/2021). At that period, the affected zones represented respectively 52,500 m (100.00%), 3050 m (5.80%), 52,500 m (100.00%), and 4050 m (7.71%).

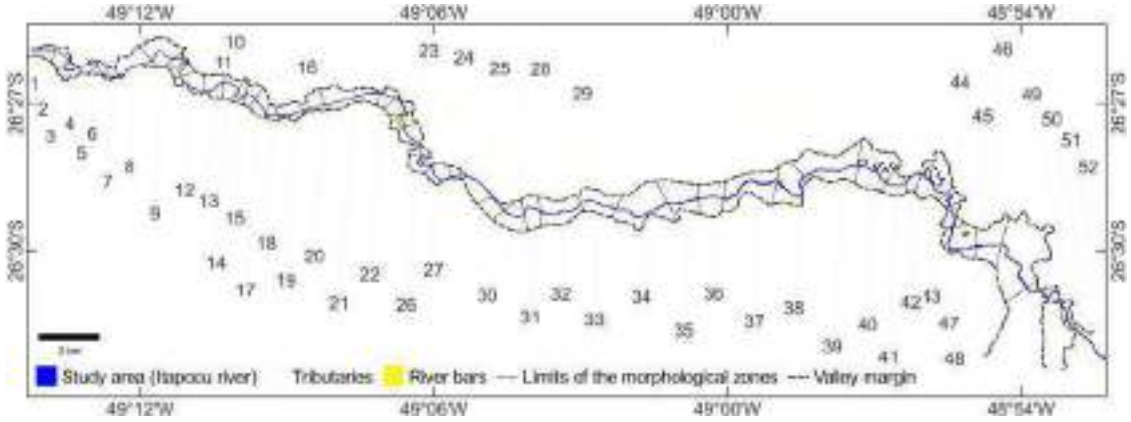


Fig. 4. Morphological zones and valley delimitation.

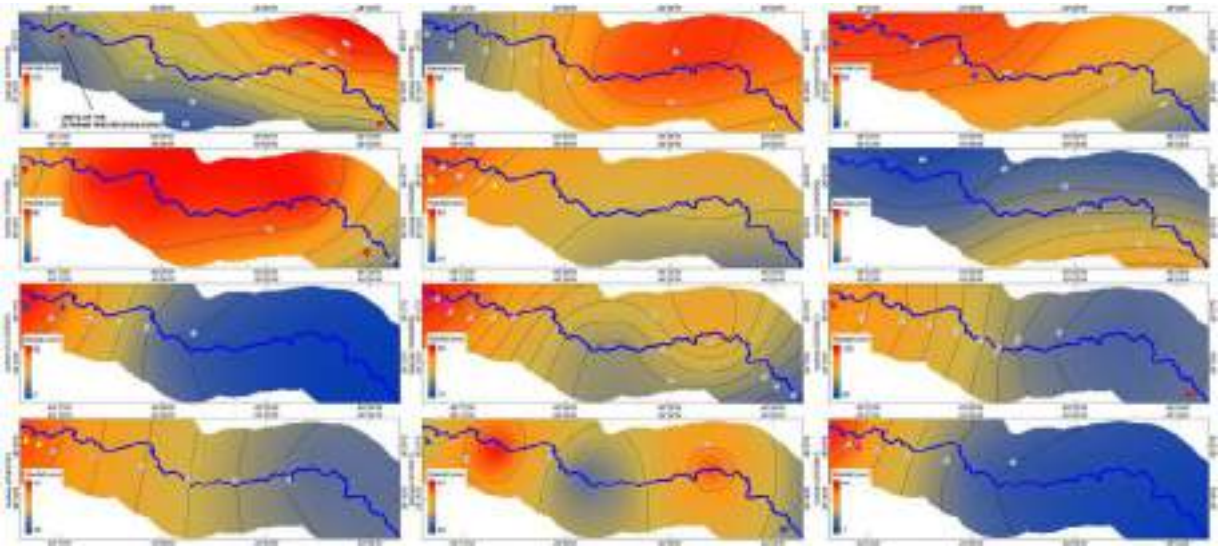


Fig. 5. Extreme precipitation distribution over the study area. Maps created from the ordinary kriging of the precipitation's accumulated frequencies during the extreme events incidence.

Adjustments identified through the riverscape geomorphometry corresponded to channel migration (CM), channel expansion (CE), and channel narrowing (CN). These were related to changes in the geometry and spatial position of the river. Adjustments associated with changes in the geometry of the river bars were river bar expansion (BE) and river bar narrowing (BN) (Fig. 6).

Between 01/30/2019 and 03/10/2021, the Itapocu River presented an average longitudinal extension of 52,500 m. During the incidence of extreme precipitation events from 01/30/2019 to 04/15/2019, the CM affected 37.71% of the river, CE 15.23%, CN 3.04%, BE 0.19%, and BN 1.14%.

From 11/15/2020 to 12/30/2020, CE affected 27.80% of the river, CN 2.66%, CM 2.47%, BN 1.52%, and BE 0.19%.

Between 02/23/2021 and 03/10/2021, CE impacted 19.23% of the river, CM 7.61%, CN 1.71%, BN 0.57%, and BE 0.19%.

3.3. Sensitivity analysis

In the sensitivity analysis with the Wilcoxon Signed Rank Test, river bar adjustments (BE and BN) did not present significant results and were classified as Stable.

In the case of the channel, between 01/30/2019 and 04/15/2019, there were no Insensitive zones. The Stable zones totaled 15, corresponding to 9290 m or 17.69% of the river. Sensitive zones summed 37, corresponding to 43,070 m or 82.03%. Significant adjustments identified in Sensitive zones were CM in 19 zones (21,280 m or 40.53% of the river), CE in 4 (3280 m or 6.24%). CM and CE presented significance for 13 zones (17,450 m or 34.55%), and CM and CN for 1 (1060 m or 2.01%) (Table 2, Fig. 7).

From 11/15/2020 to 12/30/2020, Insensitive zones totaled 13 (9860 m or 18.78%), Stable summed 15 (12,450 m or 23.71%), and Sensitive corresponded to 24 (30,280 m or 57.67%). Significant adjustments were CE for 17 zones (21,640 m or 41.21%), CM for 3 (3700 m or 7.04%), CN for 1 (670 m or 1.27%), and CM and CE for 3 (4270 m or 8.13%).

Between 02/23/2021 and 03/10/2021, Insensitive zones summed 5 (3490 m or 6.64%), Stable zones totaled 19 (15,050 m or 28.66%), and Sensitive ones corresponded to 28 (33,980 m or 64.72%). The adjustments were CE for 9 zones (12,320 m or 23.46%), CM for 8 (8080 m or 15.39%) and CM and CE for 11 (13,580 m or 25.86%).

Considering the three periods, Insensitive and Stable zones corresponded to 10 (5640 m or 10.74% regarding a 52,500 m average longitudinal extension for the river), while 42 zones (46,860 m or 89.25%) were Sensitive in at least one period.

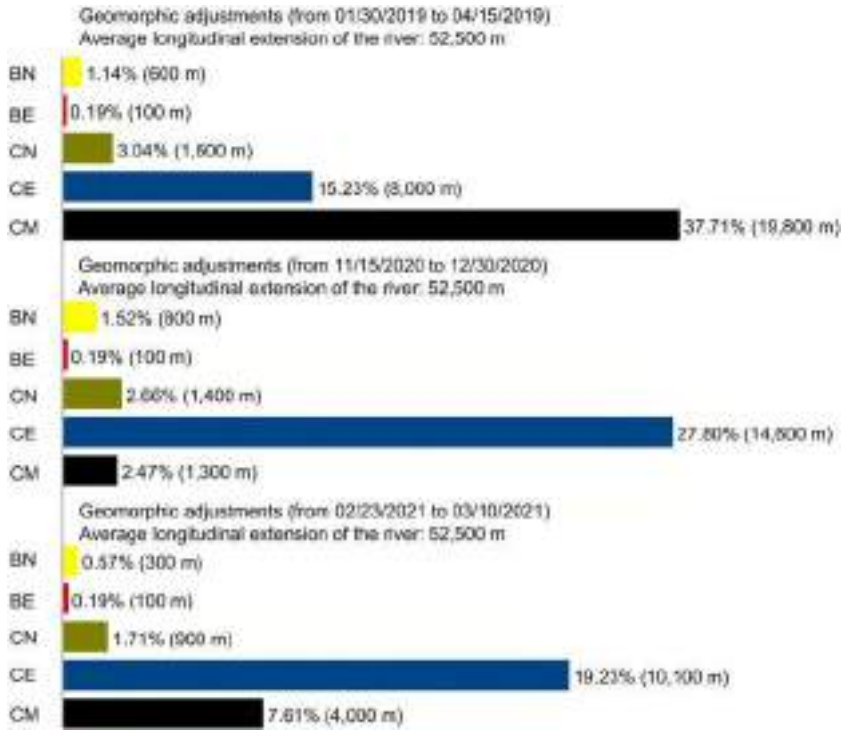


Fig. 6. Representativeness of the geomorphic adjustments of channel migration (CM), channel expansion (CE), channel narrowing (CN), river bar expansion (BE), and river bar narrowing (BN) related to the periods of occurrence of extreme precipitation events.

Table 2
Channel sensitivity according to the morphological zones and occurrence of the adjustments of channel migration (CM), channel expansion (CE), and channel narrowing (CN).

Period	Morphological zone	Test result	Conclusion	Geomorphic adjustment
1/30/2019 to 4/15/2019	1, 2, 6, 7, 10, 11, 15, 16, 18, 23, 24, 26, 35, 44	$p > 0,05$	Stable	No significant adjustment
	3, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	$p < 0,05$	Sensitive	CM–CE
11/15/2020 to 12/30/2020	1, 6, 9, 10, 14, 16, 17, 19, 28, 29, 30, 31, 35		Insensitive	No observed adjustment
	2, 5, 7, 12, 13, 15, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 36, 42	$p > 0,05$	Stable	No significant adjustment
	3, 4, 8, 11, 23, 27, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	$p < 0,05$	Sensitive	CM–CE–CN
2/23/2021 to 3/10/2021	1, 10, 14, 25, 36		Insensitive	No observed adjustment
	2, 6, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 18, 22, 26, 27, 28, 29, 31, 35, 40, 44, 45	$p > 0,05$	Stable	No significant adjustment
	3, 4, 5, 8, 12, 13, 19, 20, 21, 23, 24, 30, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	$p < 0,05$	Sensitive	CM–CE
1/30/2019 to 4/15/2019, and 11/15/2020 to 12/30/2020, and 2/23/2021 to 3/10/2021	1, 2, 6, 7, 10, 15, 16, 18, 26, 35		Insensitive or Stable	No observed or significant adjustment
	3, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52		Sensitive	Significant adjustment in at least one period

4. Discussion

4.1. Relationship between extreme precipitation events and geomorphic adjustments in the study area

Significant geomorphic adjustments in the riverscape were channel migration (CM), channel expansion (CE), and channel narrowing (CN). These were classified according to Brierley and Fryirs (2005) and Fryirs et al. (2009), which list and define general forms of geomorphic adjustments in the river landscape. Although riverscapes have environmental particularities, these general definitions are useful for identifying adjustments and can be expanded or adapted to the local fluvial context.

The geomorphic adjustments identified were due to extreme precipitation events of heavy rainfall (HR) and persistent rainfall (PR). As demonstrated (Scheidegger, 1973; Vandenberghe, 2003; Buraas et al., 2014; Basso et al., 2015; Deal et al., 2018), extreme variations in weather conditions correspond to one of the main causative agents of geomorphic adjustments, being responsible for rapid changes in the morphodynamic sculpting processes of the riverscape.

Nonetheless, the MERGE and pluviometric stations data denoted variations in the rainfall and extreme events distribution. They affected

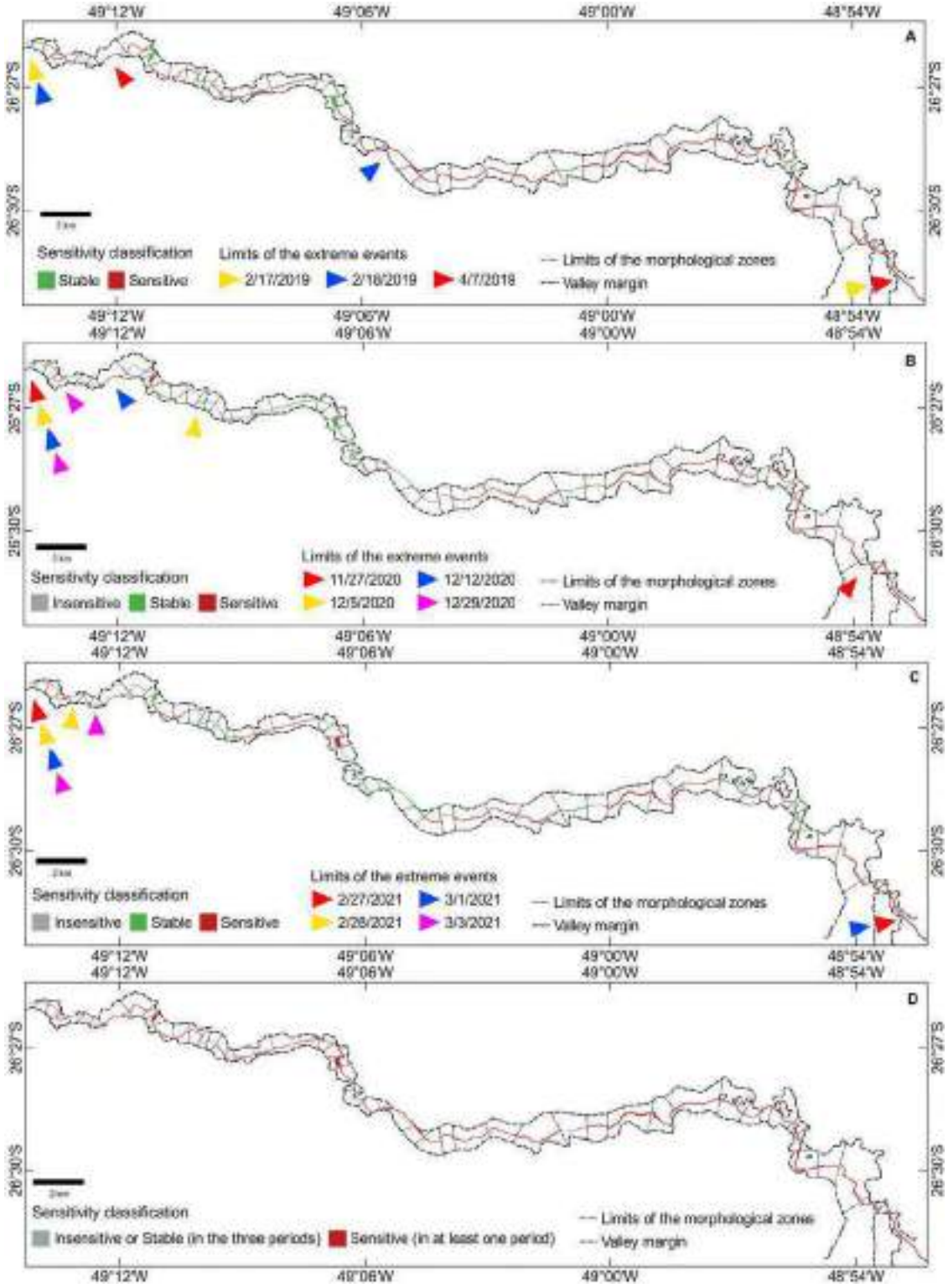


Fig. 7. Channel sensitivity to the events from 01/30/2019 to 04/15/2019 (A); 11/15/2020 to 12/30/2020 (B); 02/23/2021 to 03/10/2021 (C); and Insensitive or Stable in the three periods and Sensitive in at least one period (D).

89.25% of the river (Sensitive case), while 10.74% were Insensitive or Stable cases.

Variations in channel sensitivity were observed in every period. From 01/30/2019 to 04/15/2019, Sensitive zones corresponded to 82.03% of the river. The highest HR peak during this period occurred on 02/17/2019 (134.8 mm), and the highest accumulated precipitation in the PR was between 02/15/2019 and 02/19/2019 (291.6 mm). From 11/15/2020 to 12/30/2020, Sensitive zones corresponded to 57.67%. The most significant record of HR happened on 11/27/2020 (104.8 mm) without a PR record. Between 02/23/2021 and 03/10/2021, Sensitive zones corresponded to 64.72%. The highest HR peak was on 02/27/2021 (112.6 mm), with 256.2 mm accumulated in the PR between 02/26/2021 and 03/01/2021.

The extreme precipitation events of HR and PR, according to Cardoso et al. (2020) definitions, correspond respectively to the event of up to 1 day that exceeds the threshold of the 99th percentile of the precipitation observations and to the event whose three-day moving average (MA) exceeds the threshold of the 99th percentile. The use of percentiles in the pluviometric stations' historical series correspond to an efficient method for determining short-duration extreme events, mainly in catchment and river valley scales. By combining extreme events with data extracted from remote sensing products, precipitation data from products such as MERGE, and spatialized events from interpolation techniques such as kriging, we obtained an efficient method to identify and attribute origin to the geomorphic adjustments.

Deal et al. (2018) indicated that extreme events modify the landscape according to intensity and persistence. Considering that the extreme events variably reached the study area, the results denoted that the intensity, regarding precipitation volume and persistence over time, influenced riverscape adjustments and sensitivity. Therefore, the higher the intensity and persistence, the greater the possibility of significant adjustments along the river.

Vandenberghe (2003) considered that valley substrate geological structures difficult the correlations between the sculpting agents associated with weather and the morphodynamic processes. This correlation is complicated when the climate context does not produce extreme events capable of affecting the river's water regime (Scheidegger, 1973; Basso et al., 2015). The stability and insensitivity of certain morphological zones are probably associated with geological structures or variations in the lithological composition of the substrate. These may attribute local resistance and stability to the riverscape, resulting in a low capacity to produce significant geomorphic responses in spite of extreme precipitation events.

Sensitivity is the product of the stress imposed on the environment, resulting in the reorganization of the landscape geoforms (Fryirs, 2017). The term reflects the recognizable and significant alterations produced by these stressing phenomena, which are not temporally isolated but occur in a dynamic context (Brunsden and Thornes, 1979; Menegat and Fernandes, 1994) that overlays disturbance layers that stimulate landscape changes over time.

Significant alterations in the landscape derive from processes that can produce changes in the river's base levels, such as climate and tectonic (Schumm, 1979, 1993). This work aimed to analyze rainfall as a destabilizing factor to the riverscape, concluding that the Itapocu River was variably Sensitive to extreme precipitation events. It means that the riverscape responded actively to the stress imposed by the phenomena and that a factor associated with the climate caused imbalances in the riverscape, culminating in significant geomorphic adjustments.

Accordingly, rivers respond differently to extreme events and climate change. They are products of heterogeneous climate interactions such as phytophysiognomy and substrate structures (Prudhomme et al., 2013a,b; Basso et al., 2015; Deal et al., 2018). This complexity hinders sensitivity assessment and produces a variety of riverscape responses (Lisenby et al., 2020). Recognizing the causes and geomorphic responses is vital to understanding the sensitivity in each fluvial environment (Santos and Marçal, 2021), denoting the need to bring assessment models closer to the realities imposed by environment heterogeneities. Thus, the research demonstrated that through simple methods such as geomorphometry, interpolation, spatialization of precipitation, and analysis of the geomorphic adjustments' statistical significance, it becomes possible to determine the sensitivity of the riverscape to extreme precipitation events. Furthermore, it demonstrated that it is possible to improve the identification of geomorphic adjustments through geomorphometry of the riverscape geoforms.

4.2. Study limitations and directions for further research

Limitations are imposed by spatial resolution (SR) that reduces the positional accuracy of vectorized geoforms and embeds errors in geomorphometry. Accuracy indicates the proximity between the geospatial information and the terrain (Tolentino et al., 2017). It is recommended that tolerance parameters be established according to the research objectives to reduce errors (Tolentino et al., 2017) because low accuracy implies a lower potential for detecting landscape adjustments. It results in a less efficient sensitivity analysis.

Precipitation products such as MERGE have limited applications in landscape adjustments analysis due to the SR, yet they are applicable in the regional contextualization of precipitation phenomena. The analysis in the scale of geoforms demands a detail that pluviometric stations can provide. Interpolation of these data allows uncertainty reduction regarding the precipitation distribution, producing variable quality results according to the network of stations used (Arnon, 1990; Charles et al., 2022). This spatialization is desirable due to variations in the geographical distribution of phenomena, which may not be reflected in products such as MERGE.

The temporal resolution (TR) is a limiting factor to landscape multitemporal analysis and is worsened by obstruction effects, such as cloud cover (Boothroyd et al., 2020). Short-duration extreme events, limited to days, need low-obstruction effects and high TR to reduce the resilience effect and enable the multitemporal evaluation. This effect corresponds to the capacity of the system to return to prior conditions to the disturbance (Hohensinner et al., 2014; Phillips and Dyke, 2016). The Sentinel-2 bands applied in the methodological procedures have SR of 10 m and TR of 5 days for the constellation and 10 days for each satellite. The TR is appropriate for the multitemporal evaluation and the analysis of the effects of extreme precipitation events on the riverscape. However, the SR may difficult the use of Sentinel-2 products in research, whose study object requires high spatial resolutions. In these cases, it is necessary to previously analyze the dimensions of the study object and assess whether Sentinel-2 products can provide sufficiently accurate geospatial data.

5. Conclusion

The research investigated the correlation between geomorphic adjustments in the riverscape and the incidence of extreme precipitation events. For this, Sentinel-2 images were used to vectorize the riverscape geoforms and a geomorphometric and statistical method was designed to measure the river geoforms and evaluate the fluvial sensitivity to extreme events.

Thus, it was concluded that the Itapocu River channel was primarily Sensitive (89.25%) to extreme precipitation, while 10.74% was Insensitive or Stable to these events. Significant geomorphic adjustments involved channel expansion (CE), channel narrowing (CN), and channel migration (CM). Adjustments identified in the river bars were river bar expansion (BE) and river bar narrowing (BN). However, the sensitivity verified that these adjustments were not statistically significant and the bars remained Stable. It means that the channel responded actively to the environmental stress imposed by extreme precipitation events.

The statistics corroborated with the sensitivity analysis and the spatialization of the Sensitive areas of the fluvial environment. The results indicated the geographical non-uniformity of the riverscape responses to extreme events. The thresholds associated with the 99th percentile of the pluviometric stations' historical series denote variations in the precipitation intensity in a relatively small area. These variations may explain the non-uniformity of the spatial distribution and the differences in the statistical significance of the geomorphic adjustments.

Therefore, these events influence the sculpting processes but vary according to the intensity and persistence of the extremes. In this context, the sensitivity will follow these variations. Thus, the more intense the extreme event is concerning precipitation volume, and the longer its duration, the greater the impact on the fluvial environment. Therefore, extreme rainfall events with high precipitation volumes concentrated in a few days can produce significant geomorphic adjustments in the riverscape.

Some limitations for future research may correspond to the spatial and temporal resolution of pluviometric and remote sensing products. Data extracted from products with low resolutions may reduce the positional accuracy of the geoforms, hindering the multitemporal analysis of the riverscape and imposing obstacles to the spatialization of the extreme precipitation events.

References

Arnon, K., 1990. Application of kriging technique to areal precipitation mapping in arizona. Geojournal 22 (4), 391–398. http://dx.doi.org/10.1007/BF00174760.

Basso, S., Frascati, A., Marani, M., Schirmer, M., Botter, G., 2015. Climatic and landscape controls on effective discharge. Geophys. Res. Lett. 42 (20), 8441–8447. http://dx.doi.org/10.1002/2015GL066014.

Boothroyd, R.J., Williams, R.D., Hoey, T.B., Barrett, B., Prasojo, O.A., 2020. Applications of google earth engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change. Wiley Interdiscip. Rev. Water 8, e21496. http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1496.

Bostan, P.A., Heuvelink, G.B.M., Akyurek, S.Z., 2012. Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf. 19, 115–126. http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.010.

Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2005. Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework. Blackwell Publishing, Oxford, http://dx.doi.org/10.1002/9780470751367.

Brierley, G., Fryirs, K., Marçal, M., Lima, R., 2019. The use of the river styles framework as a tool to 'work with nature' in managing rivers in Brazil: Examples from the macaé catchment. Rev. Bras. Geomorfol. 20 (4), 751–771. http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1559.

Brunsden, D., Thornes, J.B., 1979. Landscape sensitivity and change. Trans. Inst. Br. Geogr. 4 (4), 463–484. http://dx.doi.org/10.2307/622210.

Buraas, E.M., Renshaw, C.E., Magilligan, F.J., Dade, W.B., 2014. Impact of reach geometry on stream channel sensitivity to extreme floods. Earth Surf. Process. Landf. 39, 1778–1789. http://dx.doi.org/10.1002/esp.3562.

Cardoso, C.S., Quadro, M.F.L., Bonetti, C., 2020. Persistência e abrangência dos eventos extremos de precipitação no sul do brasil: Variabilidade espacial e padrões atmosféricos. Rev. Bras. Meteorol. 35 (2), 219–231. http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786352031.

Charles, T.S., Lopes, T.R., Duarte, S.N., Nascimento, J.G., Ricardo, H.C., Pacheco, A.B., 2022. Estimating average annual rainfall by ordinary kriging and TRMM precipitation products in midwestern Brazil. J. South Am. Earth Sci. 118, 103937. http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103937.

Coan, B.D.P., Back, A.J., Bonetti, A.V., 2014. Precipitação mensal e anual provável no Estado de Santa Catarina. Rev. Bras. Climatol. 15, 122–142. http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v15i0.38348.

Crosby, B.T., Whipple, K.X., 2006. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa river, north island, new zealand. Geomorphology (Amst) 82, 16–38. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.023.

Deal, E., Botter, G., Braun, J., 2018. Understanding the role of rainfall and hydrology in determining fluvial erosion efficiency. J. Geophys. Res. Earth Surf. 123 (4), 744–778. http://dx.doi.org/10.1002/2017JF004393.

Downs, P.W., Gregory, K.J., 1995. Approaches to river channel sensitivity. Prof. Geogr. 47, 168–175. http://dx.doi.org/10.1111/j.0033-0124.1995.00168.x.

Fryirs, K.A., 2017. River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. Earth Surf. Process. Landf. 42, 55–70. http://dx.doi.org/10.1002/esp.3940.

Fryirs, K.A., Spink, A., Brierley, G., 2009. Post-European settlement response gradients of river sensitivity and recovery across the upper hunter catchment, Australia. Earth Surf. Process. Landf. 34, 897–918. http://dx.doi.org/10.1002/esp.1771.

Grimm, A.M., 2011. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 25, 537–554. http://dx.doi.org/10.1007/s00477-010-0420-1.

Hajdukiewicz, H., Wyżga, B., Mikuś, P., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A., 2016. Impact of a large flood on mountain river habitats, channel morphology, and valley infrastructure. Geomorphology (Amst) 272, 55–67. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.003.

Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontol. Electron. 4 (1), 1–9.

Hohensinner, S., Jungwirth, M., Muhar, S., Schmutz, S., 2014. Importance of multi-dimensional morphodynamics for habitat evolution: Danube river 1715–2006. Geomorphology (Amst) 215, 3–19. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.001.

Holbrook, J., Schumm, S.A., 1999. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. Tectonophysics 305, 287–306. http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00011-6.

IPCC, 2021. Climate change 2021: The physical science basis. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçiv, O., Yu, R., Zhou, B. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, http://dx.doi.org/10.1017/9781009157896.

Kleina, M., Santos, L.J.C., 2017. Sensitividade fluvial da drenagem principal da bacia hidrográfica do Rio Sagrado – serra do mar paranaense. Raega 41, 174–188. http://dx.doi.org/10.5380/raega.

Lisenby, P.E., Fryirs, K.A., Thompson, C.J., 2020. River sensitivity and sediment connectivity as tools for assessing future geomorphic channel behavior. Int. J. River Basin Manag. 18 (3), 279–293. http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2019.1672705.

Llena, M., Vericat, D., Martínez-Casasnovas, J.A., Smith, M.W., 2020. Geomorphic adjustments to multi-scale disturbances in a mountain river: A century of observations. Catena (Amst) 192, 104584. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2020.104584.

McFeeters, S.K., 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. Int. J. Remote Sens. 17 (7), 1425–1432. http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714.

Menegat, R., Fernandes, L.A.D., 1994. O método da investigação científica na geologia: a abordagem através do exemplo heurístico da caixa-preta. Rev. Bras. Geosci. 24 (3), 177–188.

Nunes, A.B., Silva, G.C., 2013. Climatology of extreme rainfall events in eastern and northern Santa Catarina state, Brazil: present and future climate. Rev. Bras. Geofis. 31 (3), 413–425. http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v31i3.314.

Oliveira, J.C., Aguiar, W., Cirano, M., Genz, F., Amorim, F.N., 2018. A climatology of the annual cycle of river discharges into the Brazilian continental shelves: from seasonal to interannual variability. Environ. Earth Sci. 77, 192. http://dx.doi.org/10.1007/s12665-018-7349-y.

Phillips, J.D., Dyke, C.V., 2016. Principles of geomorphic disturbance and recovery in response to storms. Earth Surf. Process. Landf. 41, 971–979. http://dx.doi.org/10.1002/esp.3912.

Pinto, F.M., 2020. Depósitos minerais e previsão de impactos ambientais: os modelos genéticos perau e panelas no Estado do Paraná (Brasil). Rev. Bras. Meio Ambient. 8 (1), 70–86. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3612302.

Pinto, F.M., Brentano, D., Schuch, F.S., 2021. Caracterização morfológica de um trecho do rio itapocu, região norte de santa catarina: Subsídios para a identificação de áreas de risco geomórfico. Estrab 2, 170–179. http://dx.doi.org/10.53455/re.v2i.40.

Pinto, F.M., Weber, C., 2021. Diagnóstico de uma usina de asfalto: subsídios à avaliação de impactos ambientais através do levantamento histórico e do mapeamento de riscos. Discipl. Sci. Nat. Tecnol. 22 (1), 81–98. http://dx.doi.org/10.37779/nt.v22i1.3743.

Prudhomme, C., Crooks, S., Kay, A.L., Reunard, N., 2013a. Climate change and river flooding: part 1 classifying the sensitivity of British catchments. Clim. Change 119, 933–948. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0748-x.

Prudhomme, C., Crooks, S., Kay, A.L., Reunard, N., 2013b. Climate change and river flooding: part 2 sensitivity characterization for british catchments and example vulnerability assessments. Clim. Change 119, 949–964. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0726-3.

Reid, H.E., Brierley, G.J., 2015. Assessing geomorphic sensitivity in relation to river capacity for adjustment. Geomorphology (Amst) 251, 108–121. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.009.

Rozante, J.R., Moreira, D.S., Gonçalves, L.G.G., Vila, D.A., 2010. Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over south America. Weather Forecast. 25 (3), 885–894. http://dx.doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1.

Santos, R.C., Marçal, M.S., 2021. Caracterização dos ajustes e mudanças na morfologia do rio São João, região das baixadas litorâneas do estado do Rio de Janeiro. Rev. Bras. Geomorfol. 22 (1), 149–162. http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1826.

Scheidegger, A.E., 1973. Hydrogeomorphology. J. Hydrol. 20 (3), 193–215. http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(73)90061-9.

Schumm, S.A., 1979. Geomorphic thresholds: the concept and its applications. Trans. Inst. Br. Geogr. 4 (4), 485–515. http://dx.doi.org/10.2307/622211.

Schumm, S.A., 1993. River response to baselevel change: implication for sequence stratigraphy. J. Geol. 101 (2), 279–294. http://dx.doi.org/10.1086/648221.

Silva, A.C., Silva, O.G., 2016. Análises dos padrões e estilos de canais a partir da paisagem geomorfológica fluvial na bacia do rio una/PE. R. Cerrados 14 (2), 71–92. http://dx.doi.org/10.22238/rc24482692v14n22016p71a92.

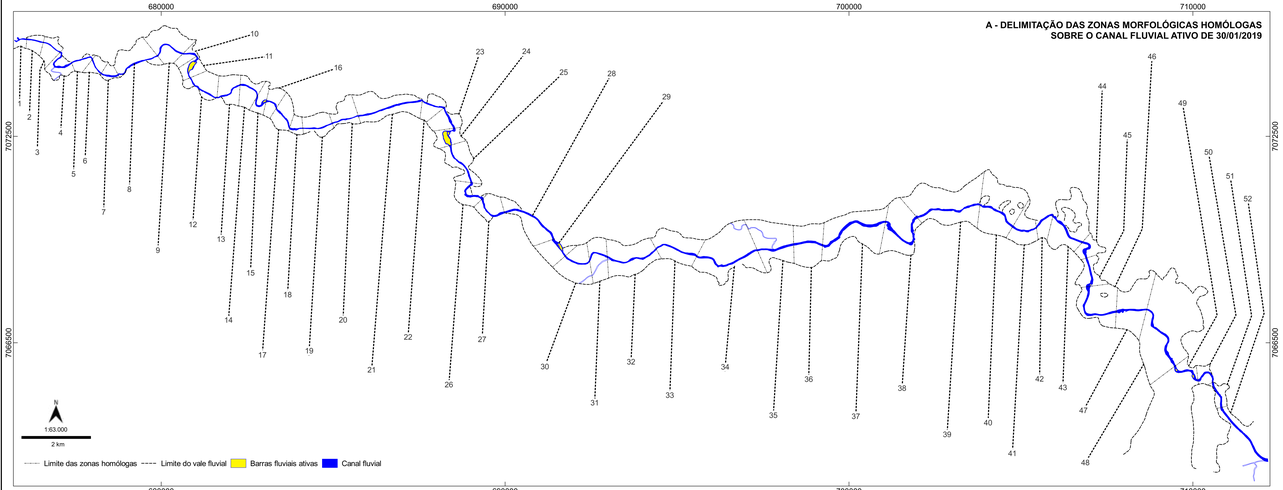
Tolentino, F.M., Silva, C.R., Santil, F.L.P., 2017. Avaliação da acurácia posicional de redes de drenagem obtidas a partir de modelos SRTM e ASTER com o uso dos softwares ARCGIS e QGIS. Rev. Bras. Cartogr. 69 (7), 1287–1301. http://dx.doi.org/10.14393/rbcv69n7-43989.

Vandenberghe, J., 2003. Climate forcing of fluvial system development: an evolution of ideas. Quat. Sci. Rev. 22 (20), 2053–2060. http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00213-0.

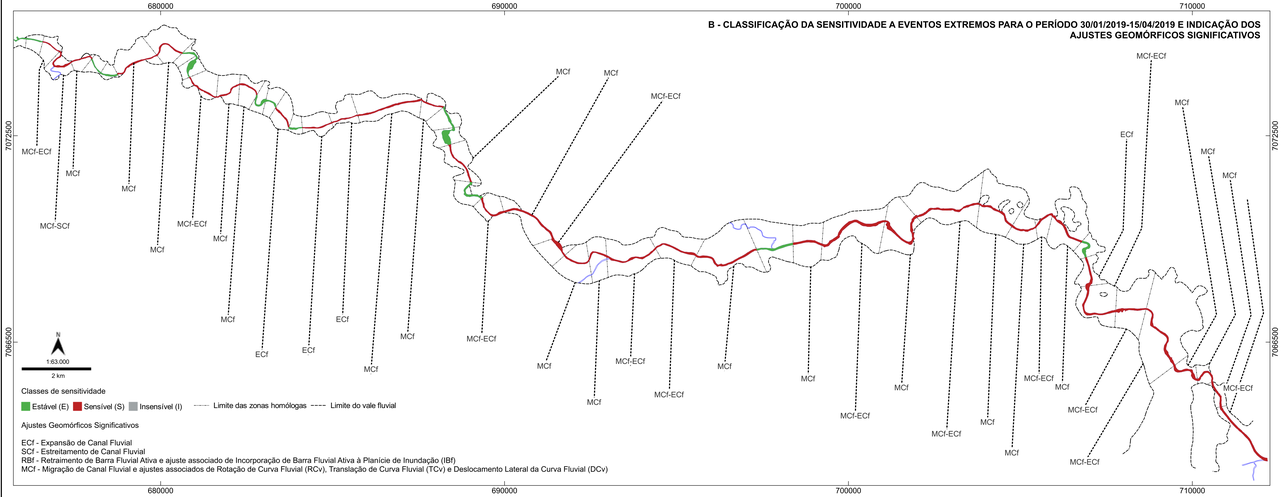
Wheaton, J.M., Fryirs, K., Brierley, G., Bangen, S.G., Bouwes, N., O'Brien, G., 2015. Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms. Geomorphology (Amst) 248, 273–295. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.010.

Wilcoxon, F., 1945. Individual comparisons by ranking methods. Biom. Bull. 1 (6), 80–83. http://dx.doi.org/10.2307/3001968.

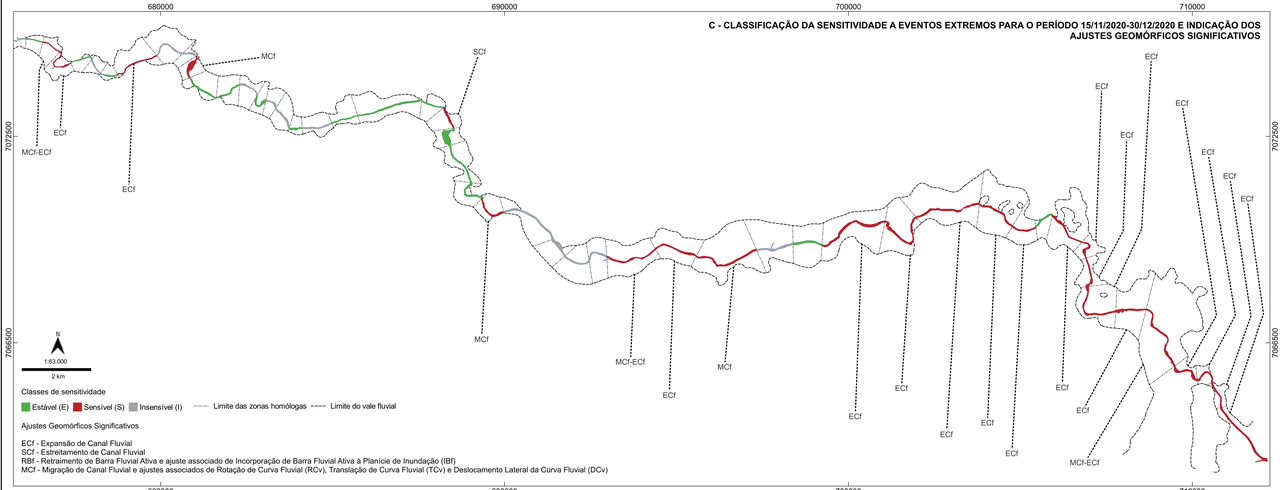
A - DELIMITAÇÃO DAS ZONAS MORFOLÓGICAS HOMÓLOGAS SOBRE O CANAL FLUVIAL ATIVO DE 30/01/2019



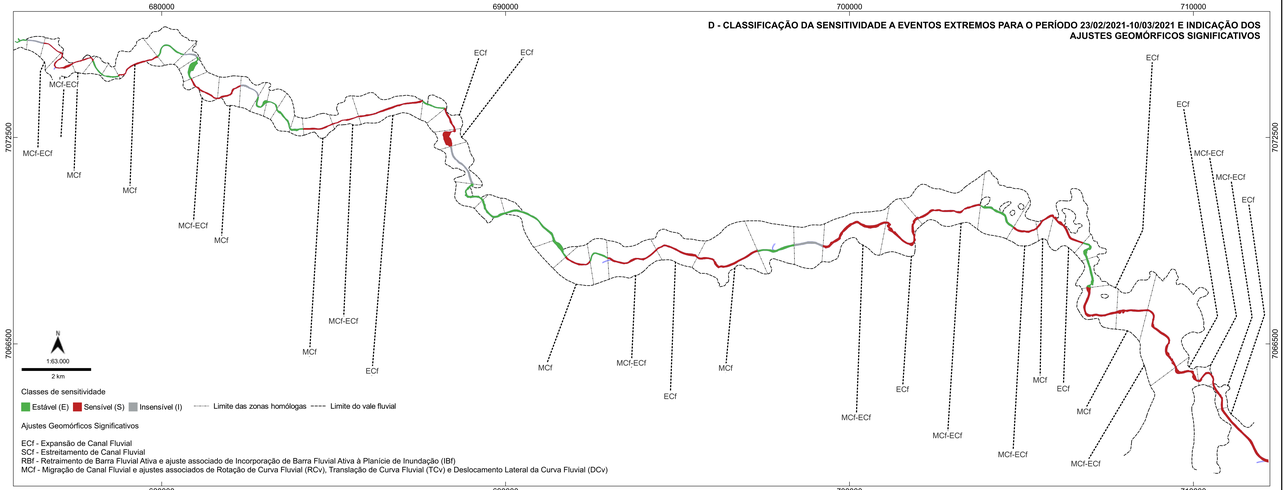
B - CLASSIFICAÇÃO DA SENSITIVIDADE A EVENTOS EXTREMOS PARA O PERÍODO 30/01/2019-15/04/2019 E INDICAÇÃO DOS AJUSTES GEOMÓRFICOS SIGNIFICATIVOS



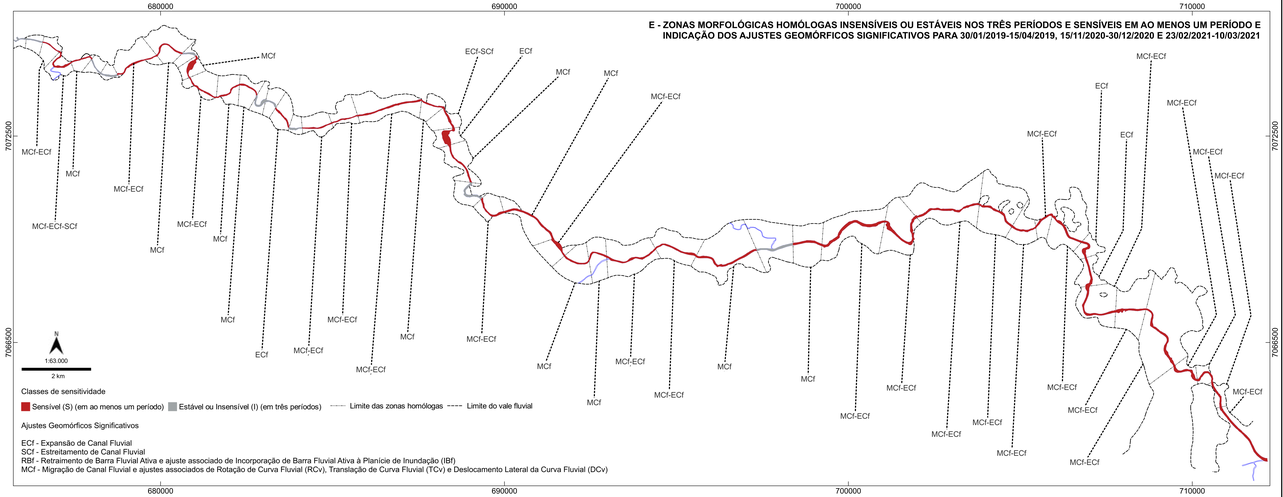
C - CLASSIFICAÇÃO DA SENSITIVIDADE A EVENTOS EXTREMOS PARA O PERÍODO 15/11/2020-30/12/2020 E INDICAÇÃO DOS AJUSTES GEOMÓRFICOS SIGNIFICATIVOS

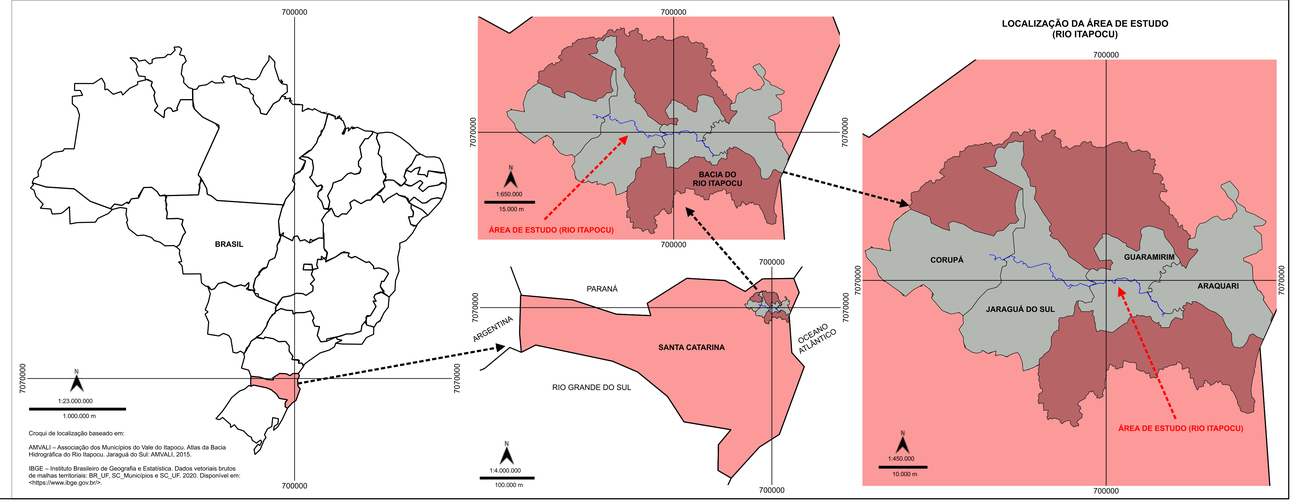


D - CLASSIFICAÇÃO DA SENSITIVIDADE A EVENTOS EXTREMOS PARA O PERÍODO 23/02/2021-10/03/2021 E INDICAÇÃO DOS AJUSTES GEOMÓRFICOS SIGNIFICATIVOS



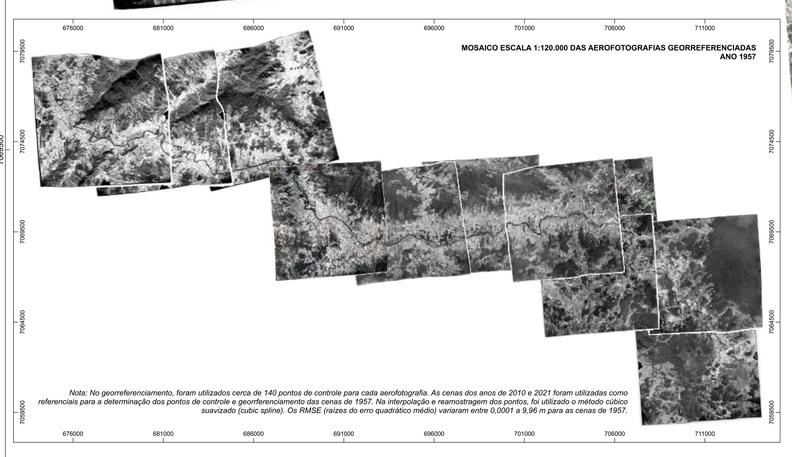
E - ZONAS MORFOLÓGICAS HOMÓLOGAS INSENSÍVEIS OU ESTÁVEIS NOS TRÊS PERÍODOS E SENSÍVEIS EM AO MENOS UM PERÍODO E INDICAÇÃO DOS AJUSTES GEOMÓRFICOS SIGNIFICATIVOS PARA 30/01/2019-15/04/2019, 15/11/2020-30/12/2020 E 23/02/2021-10/03/2021





A - UNIDADES GEOMÓRFICAS DEFINIDAS ATRAVÉS DA FOTOINTERPRETAÇÃO DE ELEMENTOS TEXTURAIS E ESTRUTURAIS DAS AEROFOTOGRAFIAS ANO DE 1957

Origem das aerofotografias: Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A. Escala 1:25.000. Cenas: 2169, 3350, 3353, 3780, 3782, 3784, 3786, 3787, 9035, 9036, 9038. Cedidas por: Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina - SDE.



N
1:31.000
1 km

LEGENDA

- Barras fluviais ativas
- Rio Itapocu e Principais Afluentes

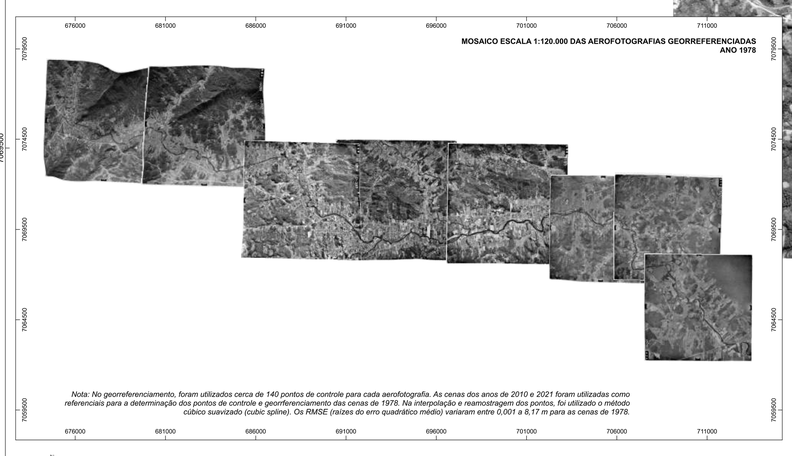
Limites do Vale Fluvial (Contatos com as Geoformas das Encostas)
- Embasamento cristalino
- Terraços colúvio-aluvionares

Geoformas do Vale Fluvial
- Barras fluviais
- Terraços fluviais
- Planícies de inundação indiferenciadas

Estruturas Fluviais
- Cordões marginais
- Bordas de terraços fluviais
- Paleocanais fluviais

B - UNIDADES GEOMÓRFICAS DEFINIDAS ATRAVÉS DA FOTOINTERPRETAÇÃO DE ELEMENTOS TEXTURAIS E ESTRUTURAIS DAS AEROFOTOGRAFIAS ANO DE 1978

Origem das aerofotografias: Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A. Escala 1:25.000. Cenas: 11184, 11188, 11193, 14434, 14439,15928, 15930, 16047. Cedidas por: Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina - SDE.



N
1:31.000
1 km

LEGENDA

- Barras fluviais ativas
- Rio Itapocu e Principais Afluentes

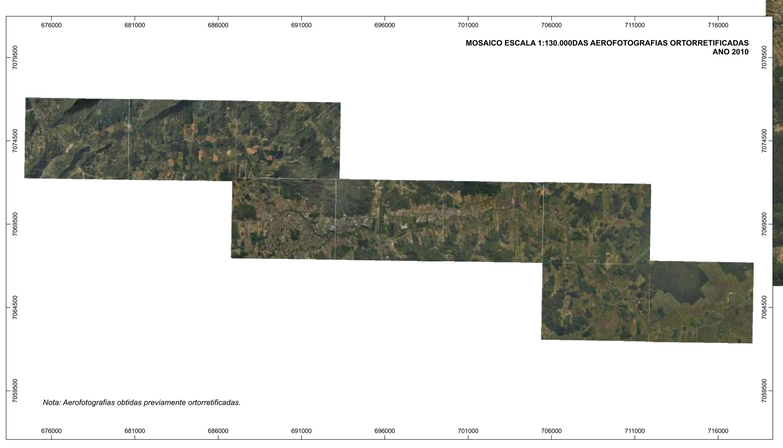
Limites do Vale Fluvial (Contatos com as Geoformas das Encostas)
- Embasamento cristalino
- Terraços colúvio-aluvionares

Geoformas do Vale Fluvial
- Barras fluviais
- Terraços fluviais
- Planícies de inundação indiferenciadas

Estruturas Fluviais
- Cordões marginais
- Bordas de terraços fluviais
- Paleocanais fluviais

C - UNIDADES GEOMÓRFICAS DEFINIDAS ATRAVÉS DA FOTOINTERPRETAÇÃO DE ELEMENTOS TEXTURAIS E ESTRUTURAIS DAS AEROFOTOGRAFIAS ANO DE 2010

Origem das aerofotografias: Engemap. Resolução Espacial 0,39 m. Cenas: Orto-RGB_SG-22-Z-B-I-4, Orto-RGB_SG-22-Z-B-II-3, Orto-RGB_SG-22-Z-B-V-1. Cedidas por: Secretaria do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina - SDE.



N
1:31.000
1 km

LEGENDA

- Barras fluviais ativas
- Rio Itapocu e Principais Afluentes

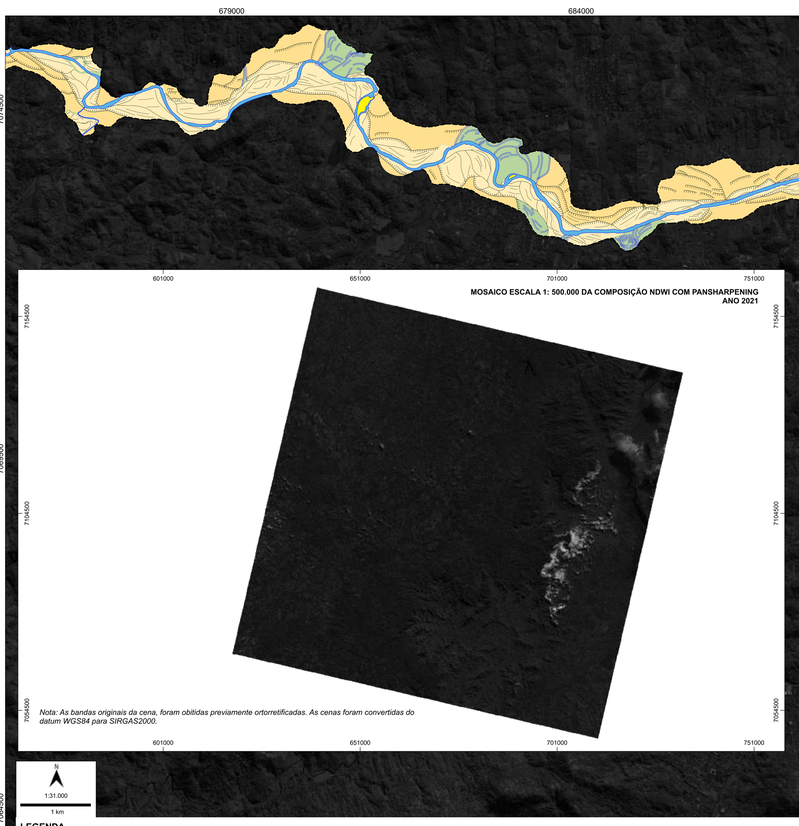
Limites do Vale Fluvial (Contatos com as Geoformas das Encostas)
- Embasamento cristalino
- Terraços colúvio-aluvionares

Geoformas do Vale Fluvial
- Barras fluviais
- Terraços fluviais
- Planícies de inundação indiferenciadas

Estruturas Fluviais
- Cordões marginais
- Bordas de terraços fluviais
- Paleocanais fluviais

D - UNIDADES GEOMÓRFICAS DEFINIDAS ATRAVÉS DA FOTOINTERPRETAÇÃO DE ELEMENTOS TEXTURAIS E ESTRUTURAIS DAS IMAGENS ORBITAIS ANO DE 2021

Origem da imagem orbital: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. CBERS 04A. Resolução Espacial 2 m. Bandas da Cena: CBERS_4A_WPM_20210625_205_146_L4. Composição NDWI com Pansharpening.



N
1:31.000
1 km

LEGENDA

- Barras fluviais ativas
- Rio Itapocu e Principais Afluentes

Limites do Vale Fluvial (Contatos com as Geoformas das Encostas)
- Embasamento cristalino
- Terraços colúvio-aluvionares

Geoformas do Vale Fluvial
- Barras fluviais
- Terraços fluviais
- Planícies de inundação indiferenciadas

Estruturas Fluviais
- Cordões marginais
- Bordas de terraços fluviais
- Paleocanais fluviais

DESCRIÇÃO SUCINTA DAS GEOFORMAS OU UNIDADES GEOMÓRFICAS:

Vale Fluvial: A delimitação do vale ocorreu através da identificação das quebras de relevo correspondentes ao contato entre geoformas da dinâmica fluvial, definidas como unidades geomórficas Terraços Fluviais e Planícies de Inundação, e as geoformas associadas aos processos morfodinâmicos das encostas rochosas. Estas, definidas como Embasamento Cristalino e Terraços Colúvio-Aluvionares, as quais limitam a expansão lateral do vale.

Embasamento Cristalino: Abrange formas de paisagem associadas aos metamorfitos e magmatitos, inclusive solos e saprólitos derivados, pertencentes às unidades litoestratigráficas Terreno Luís Alves e ao Grupo Itajaí. A unidade ocupa as encostas das serranias adjacentes ao vale; ocorre como inselbergs nas geoformas Terraços Colúvio-Aluvionares, Terraços Fluviais e Planícies de Inundação; e aflora em knickpoints nas margens e no leito do rio Itapocu.

Terraços Colúvio-Aluvionares: Geoformas desenvolvidas nas encostas e sopés das serranias, associadas a sedimentos silicáticos imaturos, mal selecionados e variegados, oriundos de múltiplas áreas fontes de detritos e pertencentes à unidade litoestratigráfica Coberturas Sedimentares do Cenozoico, foram enquadrados na unidade geomórfica. Esta, especificamente abrange sistemas de leques aluviais coalescentes e coluviões de movimentos gravitacionais de massa.

Terraços Fluviais: Abrange planícies de inundação abandonadas durante a evolução do rio, inclinadas em direção ao canal ativo na época de formação e dotadas de texturas e estruturas sedimentares reliquiares, oriundas da dinâmica fluvial pretérita. Engloba antigas barras fluviais, canais abandonados, dentre outras formas sedimentares e de relevo reliquiares, aplainadas por processos erosivos posteriores.

Planícies de Inundação: Estão associadas à dinâmica recente do rio. São áreas sujeitas a inundações periódicas e, relativamente, mais suscetíveis aos processos deposicionais e erosivos da dinâmica do canal fluvial. A unidade é dividida na subunidade Planícies de Inundação Indiferenciadas e subunidade Barras Fluviais. As Planícies de Inundação Indiferenciadas abrangem formas associadas a paleocanais, meandros abandonados e barras fluviais inativas, colmatadas e aplainadas, indivisíveis das geoformas circunvizinhas através de fotointerpretação. As Barras Fluviais correspondem a formas associadas a depósitos arenosos de canal, genericamente barras centrais e laterais, de pontal ou de meandro, abandonadas pela dinâmica do rio, incorporadas às Planícies de Inundação. As Barras Fluviais são reconhecíveis e divisíveis através da identificação dos Cordões Marginais.

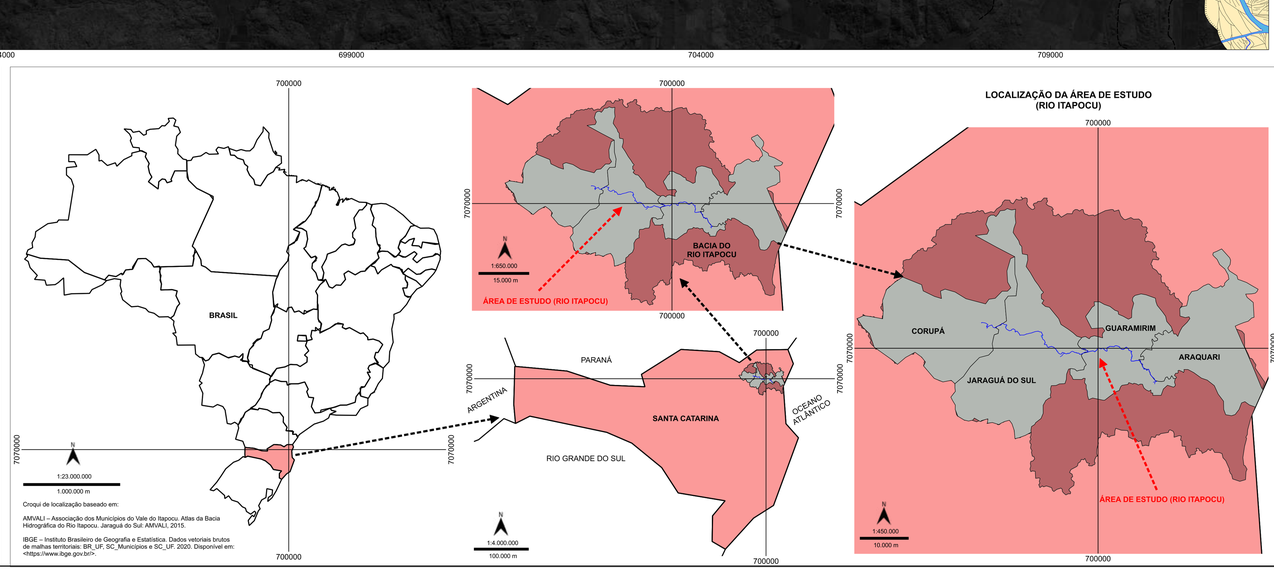
Bordas de Terraços Fluviais: Os Terraços Fluviais situam-se em patamares altimétricos acima das planícies atuais, das quais estão separados por quebras acentuadas de relevo, oriundas de migrações laterais e incisões de canal, nomeadas bordas de terraço. Estas bordas normalmente estão aplainadas por erosão e deposição gravitacional de sedimentos nos sopés, com consequente suavização das bordas acentuadas.

Cordões Marginais: Estruturas lineares deposicionais e erosionais, associadas à formação de barras fluviais, subparalelas ao fluxo hídrico da época de formação da barra.

Canal Fluvial: Corresponde à calha normal do rio Itapocu (no mapa, também são apresentados pequenos trechos dos canais de alguns afluentes). No canal, o escoamento superficial é permanente, sendo ocupado tanto no advento de estiagens, como em períodos de cheias, quando ocasionalmente pode ocorrer o transbordamento de água para as Planícies de Inundação. A calha é limitada por quebras de relevo relacionadas às cristas das margens fluviais e, frequentemente, apresenta corpos sedimentares emersos que compõe barras. Estas, podem ocasionar a divisão do canal em braços múltiplos.

Barras Fluviais Ativas: Corpos predominantemente sedimentares existentes no canal fluvial ativo. Basicamente, abrangem barras centrais e laterais, de pontal ou de meandro ativas.

Notas Finais: Os mapas apresentados acima, correspondem a produtos de mapeamento indireto das geoformas associadas ao vale fluvial do Rio Itapocu, na área de estudo. O mapeamento consistiu na identificação, vetorização e fotointerpretação das formas do relevo ou da paisagem (geoformas). O procedimento fotointerpretativo consistiu na atribuição indireta de significado aos diferentes elementos estruturais e texturais identificados nas imagens e que compõe distintas geoformas. Finalmente, houve etapa de campo para o reconhecimento da área de estudos. Esta etapa consistiu no reconhecimento visual, com baixo nível detalhe, através de caminhamento. Desse modo, não foram aplicadas técnicas de mapeamento sistemático. Nesse sentido, este produto deve ser utilizado como um mapa base, de reconhecimento, que pode ser detalhado através de técnicas de campo, amostragem sistemática, de prospecção direta e indireta, além de métodos de mapeamento sistemático.



Estrabão
Vol(2):170 - 179
©The Author(s) 2021
DOI: 10.53455/re.v2i.40

CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DE UM TRECHO DO RIO ITAPOCU, REGIÃO NORTE DE SANTA CATARINA: SUBSÍDIOS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO GEOMÓRFICO

Fábio Pinto[1], Débora Brentano[2,1] and Fernanda Simoni[2]

Abstract
Processos morfodinâmicos desenvolvidos em ambiente fluvial, estão relacionados a fatores naturais que propiciam alterações periódicas na paisagem e às litoestruturas preexistentes que controlam o substrato do vale fluvial. Os principais fatores naturais que propiciam as alterações, correspondem a atividade tectônica, capaz de alterar os padrões altimétricos do terreno, e a atividade climática, controladora do regime de precipitação. Por outro lado, a depender da composição e da configuração estrutural do substrato, este poderá controlar a mecânica evolutiva dos rios. Estudos de sensitividade fluvial, podem se restringir a análises encerradas em processos ou parâmetros particulares, com a finalidade de elucidar problemas específicos do ambiente. Por outro lado, podem possuir tendências generalistas, principalmente quando centrados na discussão dos efeitos sinergísticos dos processos que imputam alterações ao ambiente e dos controles naturais que proporcionam resistência e resiliência ao ambiente. Desse modo, o trabalho pretendido, visa analisar as interações entre chuvas e condicionantes do substrato na evolução da paisagem fluvial, através da integração de dados pluviométricos com dados geoespaciais, extraídos de mapeamento multitemporal das alterações morfológicas nas geoformas do vale fluvial.
Palavras-chave:

Keywords
morfologia fluvial, sensitividade de paisagem, cartografia temática.

INTRODUÇÃO

A sensitividade denota a paisagem como o produto de um conjunto de fenômenos que organizam e retrabalham as geoformas da paisagem, obedecendo às características do substrato (Fryirs, 2017) ou especificamente ao arcabouço litoestrutural de controle do terreno.

A análise da sensitividade, implica na avaliação da paisagem a partir da investigação dos seus limiares de estabilidade (geomorphic thresholds), propriamente da identificação dos fatores de modificação e dos controles geomórficos do terreno, permitindo a elaboração de modelos geoambientais fidedignos para o desenvolvimento da política ambiental, o planejamento da ocupação territorial, a melhoria da qualidade funcional do ambiente e, consequentemente, para a gestão ambiental e de riscos naturais (SCHUMM, 1979; SILVA & SILVA, 2016; FRYIRS, 2017) (Fryirs, 2017; Schumm, 1979).

Geoformas sedimentares associadas às paisagens fluviais, são especialmente sensíveis a quaisquer perturbações nas condicionantes ambientais do sistema (SCHUMM, 1979, 1993; HOLBROOK & SCHUMM, 1998;) (Crosby & Whipple, 2006). Condições de desequilíbrio, com alterações nos padrões de migração lateral, incisão, agradação e degradação sedimentar, e mudanças substanciais na paisagem fluvial, decorrem por influência de processos que podem provocar alterações nos níveis de base locais, ou fluviais, como aqueles associados ao clima (SCHUMM, 1979, 1993;) (Crosby & Whipple, 2006).

A precipitação é considerada o principal agente de modificação da paisagem sob controle do clima, com impacto direto no regime de escoamento superficial, sendo este, um dos mecanismos de modelação mais relevantes (GILBERT, 1877;) (Deal, Botter, & Braun, 2018; Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973). Entretanto, há uma disparidade na influência da precipitação na paisagem (Deal et al., 2018). Processos morfodinâmicos são influenciados pelo montante anual da precipitação, mas são os extremos episódicos que, em curtos períodos de tempo, afetam intensamente a paisagem (GILBERT, 1877; Basso, Frascati, Marani, Schirmer, & Botter, 2015; Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973).

Portanto e considerando que o reconhecimento da sensitividade, proporciona a identificação dos controles litoestruturais que imputam resistência geomórfica ao sistema; que a integração de dados relativos a esses controles, com dados de origem climática, como aqueles relativos a extremos de precipitação, auxilia na investigação dos limiares de estabilidade do ambiente; que um distúrbio que ultrapassa o limiar de estabilidade do ambiente, tem propensão para ocasionar alterações reais e duradouras, tanto no sentido de migração lateral, de incisão, ou alterações nas dimensões do canal fluvial; e, finalmente, que os resultados da análise de sensitividade, podem ser traduzidos em produtos de cartografia temática, úteis para a gestão e o planejamento territorial, o trabalho analisará as interações entre chuvas e condicionantes do substrato na evolução das paisagens fluviais.

[1] Mestrado Profissional em Clima e Meio Ambiente, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
[2] Instituto Federal de Santa Catarina, 3) Eng. Civil, Dra. Coorientadora
Emails: brentano@ifsc.edu.br (Débora Brentano), fernanda@ifsc.edu.br (Fernanda Simoni)

Corresponding author:
Fábio Pinto, Mestrado Profissional em Clima e Meio Ambiente, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
Email: fabiomacielpinto@gmail.com

Para tanto, utilizará como área de estudo, um trecho do rio Itapocu, situado entre os municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim e Araquari, no Estado de Santa Catarina. Nesse trecho, será determinada a sensitividade do ambiente fluvial ao desenvolvimento de processos morfodinâmicos capazes de ocasionar alterações morfológicas cartografáveis, nos padrões de estilo fluvial. Para isso, almeja-se caracterizar ajustes e alterações espaciais na morfologia do canal do rio; caracterizar litoestruturas associadas ao controle morfoestrutural do canal; analisar a relação entre episódios de extremos de precipitação e alterações espaciais na morfologia do canal. Ao final será elaborada carta de sensitividade ao desenvolvimento de processos de ajuste morfológico, ou migração do canal fluvial.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Gilbert (1877), identificou agentes de esculpimento e degradação da paisagem, elencando a chuva dentre os principais. Para Gilbert (1877), todos os processos de denudação são diretamente afetados pelo montante médio das chuvas ao longo do ano, sendo acelerados ou diminuídos pelas variações periódicas nas taxas de precipitação. Para os rios, os períodos em que a precipitação provoca eventos episódicos de cheias e inundações, são mais significativos para os processos de modelagem da paisagem fluvial do que períodos de monotonia, ou de chuvas bem distribuídas (GILBERT, 1877).

Scheidegger and Hydrogeomorphology (1973), em premissa semelhante, considera a água, o agente mais importante na modelagem da paisagem, causando alterações no equilíbrio das formas de relevo. A água de runoff ou de escoamento superficial, causaria os principais efeitos de modelação, afetando a estabilidade das encostas, parcialmente percolando no substrato, alimentando os aquíferos e, parcialmente, sendo capturada pelos rios (Deal et al., 2018; Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973).

Nos rios, eventos hidrológicos significantes que incrementam o fluxo hídrico por períodos curtos de tempo, são relativamente mais significativos para a modelagem da paisagem, ante as variações médias no montante da precipitação (GILBERT, 1877;) (Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973). Esses eventos estão diretamente associados à chuva dramaticamente concentrada que ocasiona o aumento da capacidade erosiva, ao ponto de proporcionar alterações morfológicas drásticas no sistema fluvial, causando destabilizações relativas ao rompimento de margens, além de enchentes (GILBERT, 1877;) (Scheidegger & Hydrogeomorphology, 1973).

Nesse sentido, Bower, Hannah, and Mcgregor (2004), estabeleceram equações que correlacionam fluxo hídrico, precipitação, temperatura do ar e as alimentaram com dados coletados durante 25 anos, relativos a esses parâmetros. Demonstraram que rios são sensíveis às variações nos padrões das chuvas e, enquanto não foi estabelecida relação clara entre temperatura do ar e fluxo hídrico (Bower et al., 2004).

Para Basso et al. (2015), a pluviosidade afeta os ambientes fluviais de maneira não linear, a depender do contexto climático, ao produzir regimes heterogêneos, ou monótonos de escoamento nos rios. Situações em que o contexto é propício à concentração de chuvas em determinados períodos, favorecem a erosão e o transporte clástico, sendo mais significativos para a evolução paisagem fluvial.

Desse modo, há uma disparidade ante a escala geológica do tempo na ação climática em diferentes paisagens pois, enquanto as taxas de chuva associadas ao ambiente fluvial, em horas ou dias, podem conduzir a respostas erosivas relevantes e registráveis, por outro lado, em outros ambientes da paisagem, uma resposta relevante sob as mesmas taxas, poderá levar séculos, ou milênios (Deal et al., 2018).

A influência de mudanças climáticas, igualmente, ocorrerá de maneira não linear, podendo impactar na disponibilidade de sedimentos, modificar os regimes de escoamento, reduzir ou ampliar a energia do

fluxo hídrico (Deal et al., 2018). Prudhomme et al. (2013a, 2013b), de maneira generalizada, consideram bacias hidrográficas sensíveis a mudanças climáticas. Ainda que cada bacia absorva e responda de forma particular aos impactos das mudanças, obedecendo às suas características físicas, respostas geomórficas a eventos extremos, ocasionados por alterações nos padrões do clima, podem ocorrer em período, relativamente, curto (2 a 20 anos).

Nesse contexto, cenários de mudanças climáticas com aumento na concentração de CO2 e aerossóis de sulfato na atmosfera, são especialmente preocupantes quanto ao impacto nas bacias e rede hidrográfica. A depender do contexto, essas condições podem ocasionar aumento nas taxas de precipitação e no volume de água transportada nos rios, com alterações temporais nos períodos de ocorrência de inundações e de pico de inundações (Jha, Arnold, Gassman, Giorgi, & Gu, 2006; Simonovic & Li, 2004).

Para N Notebaert and Verstraeten (2010), em análise de escala geocronológica, os efeitos de variações nos padrões climáticos em ambientes fluviais são claros. Dados estratigráficos, radiométricos e paleoclimáticos, extraídos de amostras de sedimentos de planícies fluviais da região central e leste da Europa, denotam clara relação entre alterações nos padrões de deposição aluvial e mudanças no clima ocorridas ao longo do Holoceno, com mudanças no clima impactando diretamente nos padrões de escoamento e deposição dos rios (Notebaert & Verstraeten, 2010).

METODOLOGIA

A metodologia se baseia na integração de dados morfoestruturais e pluviométricos, estes visando a identificação de episódios de extremos para incorporação na análise da sensitividade. Uma vez identificados os episódios.

Imagens de satélite serão utilizadas para caracterizar a rede fluvial em período diretamente associado aos eventos pluviométricos identificados. A partir das imagens serão obtidos dados geoespaciais (mapeamentos das margens fluviais e geoformas de fundo de vale para diferentes datas), buscando-se a identificação de possíveis alterações ocorridas após a ocorrência de eventos extremos.

ÁREA DE ESTUDO

Para mapear a sensitividade do canal fluvial, adotou-se uma área de estudos corresponde a um trecho do rio Itapocu, localizado em Santa Catarina, entre os Municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim e Araquari (Figura 1). O trecho abrange a um segmento longitudinal do rio, com cerca de 52,3 km, limitado na montante pela confluência dos rios Novo e Humboldt (UTM 675.832 E / 7.075.311 S) e na jusante pela desembocadura do rio Putanga (UTM 712.028 E / 7.063.098 S).

EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS

Dados horários brutos, sem correção de falhas, foram extraídos de pluviômetros automáticos da rede observacional do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (www2.cemaden.gov.br). Os dados foram obtidos para os municípios de Corupá, Jaraguá do Sul, Guaramirim e Araquari/SC, abrangendo o período entre 01/01/2016 e 31/08/2021 (2070 dias). Em seguida, houve a seleção primária das estações ativas, preferenciando-se aquelas situadas a uma distância de até 250 m da área de estudo. Ou seja, aproximadamente instaladas no vale fluvial e consideradas representativas para eventos incidentes na área. As estações selecionadas foram: João Tozini

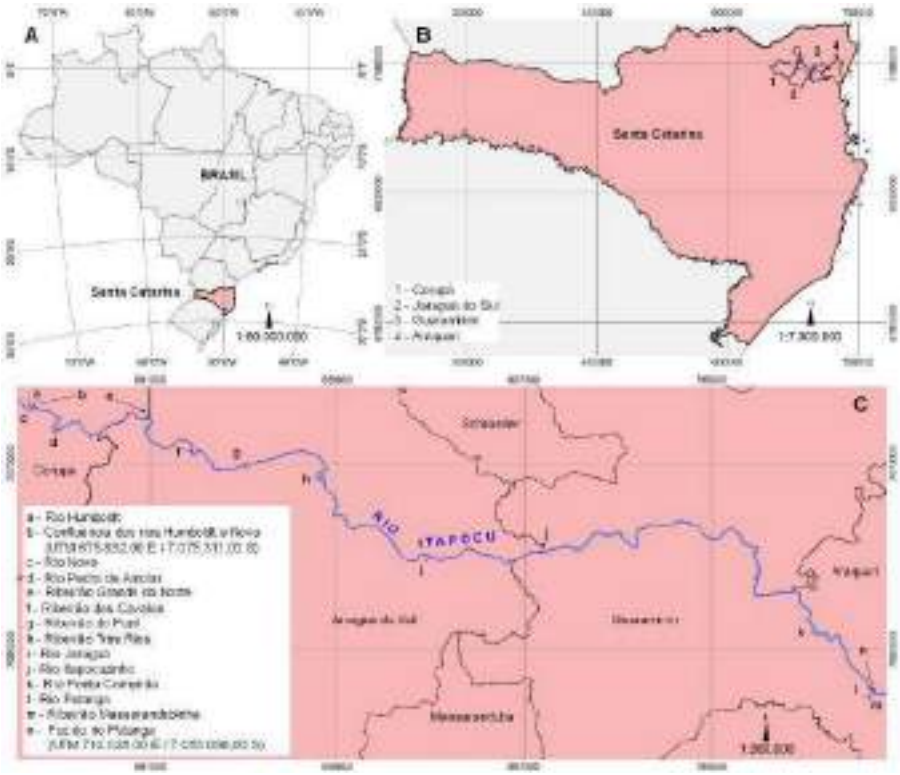


Figure 1. – Croqui de localização da área de estudo e de identificação de hidrônimos para referência situacional. Fonte de dados geoespaciais brutos: SDE (2015), IBGE (2020).

– 420450903A, situada em Corupá; Bombeiro do Centro – 420890601A e SAMAE Ilha da Figueira – 420890606A, situadas em Jaraguá do Sul; e Bananal – 420650403A, situada em Guaramirim.

Essas estações apresentaram, respectivamente e aproximadamente 2,5%; 0,8%; 2%; e 0,5% de falhas nos dados brutos do período. Desse modo, os eventos selecionados para análise, foram extraídos apartir da estação com menor quantidade de falhas (420650403A – Bananal). Foram obtidas as frequências acumuladas diárias (24h) para a estação e elencadas aquelas superiores a 100mm, correspondentes aos dias 07/02/2020 (126,8mm), 19/05/2017 (119,8mm), 18/02/2019 (112,2mm), 22/05/2016 (108mm), 27/11/2020 (104,8mm) e 27/02/2021 (101mm).

MAPEAMENTO MORFOESCULTURAL

Os procedimentos serão desenvolvidos em ambiente GIS – QGIS3.20. O mapeamento será iniciado com o delineamento e classificação dos limites do fundo do vale, os quais restringem a evolução lateral do canal fluvial. Essa etapa será realizada através de fotointerpretação (Arcanjo & Fotogeologia, 2011; Guy, 1966; Soares & Fiori, 1976) e vetorização das margens, com o uso de Modelos Digitais de Terreno (MDT), resolução espacial (r.e.) 1 m, do levantamento aerofotogramétrico de Santa Catarina, disponíveis na plataforma SIGSC (sig.sc.gov.br). Os MDTs serão renderizados em modelo de relevo sombreado de altitude 45º, azimute 315º e fator Z de 3 m.

Nas etapas de mapeamento multitemporal, dados geoespaciais serão extraídos de imagens multiespectrais, Level-1C, sensores MSI (Multispectral Instrument) da missão Sentinel-2. As imagens selecionadas, correspondem a cenas disponíveis nas plataformas Copernicus Open Acess Hub (scihub.copernicus.eu) e EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov), capturadas antes e depois dos eventos selecionados: 18/02/2019 (datas das imagens: 30/01 e 15/04/2019), 27/11/2020 (datas: 15/11 e 30/12/2020) e 27/02/2021 (datas: 23/02 e 10/03/2021).

A partir das imagens, serão realizadas classificações morfológicas multitemporiais e de estilos do canal ao longo do período de estudo, as quais seguirão as etapas: a) realce do canal através do índice da diferença normalizada da água de Mcfeeters (1996) [NDWI=B3(GREEN)-B8(NIR)/B3(GREEN)+B8(NIR)]; b) fotointerpretação (Arcanjo & Fotogeologia, 2011; Guy, 1966; Soares & Fiori, 1976) e vetorização; c) segmentação do canal em zonas com padrões morfológicos homólogos (Arcanjo & Fotogeologia, 2011); d) caracterização morfológica e morfométrica do canal (Brierley & Fryirs, 2005; Fryirs, Wheaton, & Brierley, 2016; Rinaldi, Gurnell, Tánago, Bussettini, & Hendriks, 2016).

Finalmente, haverá a delimitação das geoformas, a qual visa a subdivisão do terreno em unidades morfológicas e a extração de informações multitemporais sobre a evolução espacial dessas unidades ao longo do período de estudo. Esse procedimento ocorrerá a partir do realce das geoformas através de razões de bandas, r.e. 10 e 20 m, conforme Miranda, Duarte, Gomes, Souza, and Neto (2019), [B8(NIR)/B12(SWIR2)] e [B8a(VNIR)/B12(SWIR)], seguido de fotointerpretação, vetorização e classificação das geoformas de acordo com suas características morfológicas e estruturais, conforme convenções de IBGE (1998, 2009).

A partir da identificação de ocorrências, ou não, de alterações morfológicas no canal fluvial ao longo do período, após os eventos selecionados, será elaborado produto cartográfico final. Esse produto corresponderá a um mapa de sensitividade do ambiente fluvial, abrangendo a área de estudo, em escala de detalhe a semidetalhe. O mapa identificará as geoformas existentes no fundo do vale fluvial, o canal atual do rio e os trechos do rio e do vale sensíveis a alterações morfológicas balizadas pelo padrão dos eventos pluviométricos selecionados. Desse modo, o produto demonstrará os trechos sensíveis a alterações, tendo em vista a ocorrência de determinados fenômenos pluviométricos (com determinada intensidade e duração).

REFERÊNCIAS

Arcanjo, J. B. A., & Fotogeologia. (2011).

Barros, A. C. M., Souza, J. O. P., & Correa, A. C. B. (2010). *Sensitividade da paisagem na bacia do riacho do mulungu*. Belém de São Francisco, Pernambuco.

Basso, S., Frascati, A., Marani, M., Schirmer, M., & Botter, G. (2015). Climatic and landscape controls on effective discharge. *Geophysical Research Letters*, *42*, 8441-8447.

Bower, D., Hannah, D. M., & Mcgregor, G. R. (2004). (Vol. 18).

Brierley, G. J., & Fryirs, K. A. (2005). *Geomorphology and river management: Applications of the river styles framework*. Oxford, UK: Blackwell Publishing.

Brunsden, D., & Thornes, J. B. (1979).

Crosby, B. T., & Whipple, K. X. (2006). *Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the*. Waipaoa River, North Island, New Zealand. Geomorphology.

Deal, E., Botter, G., & Braun, J. (2018). Understanding the role of rainfall and hydrology in determining fluvial erosion efficiency. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*(123), 744-778.

Estatística, I. I. B. D. G. E. (n.d.). Retrieved from <https://www.ibge.gov.br/>

Estatística, I. I. B. D. G. E. (1998).

Fryirs, K. A. (2017). River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, *42*, 55-70.

Fryirs, K. A., Wheaton, J. M., & Brierley, G. J. (2016).

Gilbert, G. K. (n.d.).

Guy, M. (1966). Quelques principes e quelques experiences sur la methodologie de la photo-interpretation. In *Symposium International de Photo-Interpretation (SIPI)* (Vol. 2, p. 21-41).

Holbrook, J., & Schumm, S. A. (1999).

(n.d.). Retrieved from <http://sigsc.sc.gov.br/>

Jha, M., Arnold, J. G., Gassman, P. W., Giorgi, F., & Gu, R. R. (2006). Climate change sensitivity assessment on Upper Mississippi river basin streamflows usin SWAT. *Journal of the american water resources association*(4), 997-1015.

Mcfeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*(7), 1425-1432.

Miranda, M. P., Duarte, C. R., Gomes, D. D. M., Souza, C. D., & Neto, C. A. S. (2019). *Análise comparativa de imagens sentinel 2a (msi) e landsat-8 (oli) aplicadas ao mapeamento geológico, região de itataia*. Santa Quitéria, CE.

Notebaert, B., & Verstraeten, G. (2010). Sensitivity of west and central european river systems to environmental changes during the Holocen: a review. *Earth-Science Reviews*(103), 163-182.

Prudhomme, C., Crooks, S., Kay, A. L., & Reunard, N. (2013a). Climate change and river flooding: parte 1 classifying the sensitivity of British catchments. *Climatic Change*, *119*, 933-948.

Prudhomme, C., Crooks, S., Kay, A. L., & Reunard, N. (2013b). Climate change and river flooding: parte 2 sensitivity characterisation for british catchments and example vulnerability assessments. *Climatic Change*, *119*, 949-964.

Rinaldi, M., Gurnell, A. M., Tánago, M., Bussettini, M., & Hendriks, D. (2016). Classification of river morphology and hydrology to support management and restoration. *Aquatic Sciences*, *78*, 17-33.

Scheidegger, A. E., & Hydrogeomorphology. (1973). *Journal of Hydrology*, *20*, 193-215.

Schumm, S. A. (1979).

Schumm, S. A. (1993). River response to baselevel change: implication for sequence stratigraphy. *The Journal of Geology*, *101*(2), 279-294.
Simonovic, S. P., & Li, L. (2004). (Vol. 18).
Soares, P. C., & Fiori, A. P. (1976).

Author Biographies

Fábio Pinto Discente do Mestrado Profissional em Clima e Ambiente

Débora Brentano Orientadora**,** docente do Instituto Federal de Santa Catarina e do Mestrado Profissional em Clima e Ambiente.

Débora Brentano Co-orientadora e docente do Instituto Federal de Santa Catarina.

Resources, Environment and Sustainability 13 (2023) 100124

Contents lists available at ScienceDirect

Resources, Environment and Sustainability

journal homepage: www.elsevier.com/locate/resenv

Extreme precipitation events and geomorphic adjustments in the riverscape: A case study in Southern Brazil

Fábio Maciel Pinto *, Fernanda Simoni Schuch, Débora Monteiro Brentano

Federal Institute of Education Science and Technology of Santa Catarina (IFSC), Graduate Program in Climate and Environment (PCAM), Florianópolis 88020-300, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Climate changes
Geomorphometry
Fluvial system
Landscape geomorphology
Remote sensing
Catchment

ABSTRACT

Extreme precipitation events can cause geomorphic adjustments in the riverscapes. As a result of the increase in severity and frequency of these events in climate change scenarios, riverscapes may become more sensitive to the geoforms sculpting processes. Consequently, communities in the river valleys may be adversely affected, worsening socio-environmental problems arising from these places' occupation. This work investigates the relationship between events classified as heavy rainfall and persistent rainfall and geomorphic adjustments in the riverscape. A section of the Itapocu River in southern Brazil between latitudes 26°25'S and 26°32'S was used as a case study. Extreme events recorded in pluviometers' historical series located around the study area were selected and characterized. These events occurred between 01/30/2019 and 04/15/2019; 11/15/2020 and 12/30/2020; 02/23/2021 and 03/10/2021. The geomorphic adjustments were identified by selecting Sentinel-2 orbital imagery. The satellite images were applied in the river valley geoforms vectorization and correlation among transverse and longitudinal sections to the river valley. The analysis of fluvial sensitivity went through the adjustments' significance evaluation by the Wilcoxon Signed Rank Test. The results indicated that the river presented adjustments related to extreme precipitation events. These adjustments were identified as channel migration, channel expansion, channel narrowing, river bar expansion, and river bar narrowing. However, only channel migration, channel expansion, and channel narrowing were significant. In 2019, 82.03% of the river was significantly affected by the events, while in 2020 and 2021, events impacted 57.67% and 64.72% of the river, respectively.

1. Introduction

Geomorphological systems are continually subject to perturbations. These disturbances may result from natural phenomena that, in a spatially complex and transient manner, affect the landscape geoforms causing environment instabilities and the migration to a new state of relative morphological stability (Brunsden and Thornes, 1979).

The concept of sensitivity expresses the relationship between controls that attribute resistance and resilience to the landscape and the distribution of events capable of causing disturbances in the geoforms (Brunsden and Thornes, 1979; Schumm, 1979; Fryirs, 2017). Thus, it analyzes landscapes from the geomorphic threshold and modification factors. Sensitivity denotes the landscape as the dynamic result of sculpting agents and relief controls over time in geographic space.

For environmental management purposes, sensitivity may determine the impact of the disturbance events on the landscape (Downs and Gregory, 1995). Understanding the implications of the events provides key conceptual information to underpin environmental management practices, especially in the management and assessment of environmental impacts on water resources (Reid and Brierley, 2015). These resources are under increasing pressure from human activities and climate change (Prudhomme et al., 2013a,b; Brierley et al., 2019; Pinto et al., 2021).

The riverscapes are sensitive to geomorphic adjustments, mainly because the river morphology is determined by the interaction between the transfer of water and sediment at different temporal scales, according to the magnitude of the disturbance events (Deal et al., 2018; Llena et al., 2020). These adjustments are associated with alterations in the runoff regime, which controls channel migration, incision, avulsion, aggradation, sedimentary degradation processes, and may cause permanent changes in the riverscape (Schumm, 1979, 1993; Holbrook and Schumm, 1999; Crosby and Whipple, 2006).

As a primary water source, atmospheric precipitation is vital for runoff and relief modeling (Scheidegger, 1973; Deal et al., 2018). However, the influence varies according to the rainfall regime, with well-distributed precipitation producing constancy in the water flow and slow riverscape modeling, while extreme events generate high-energy flows that quickly expand the erosion capacity of rivers and may

* Corresponding author.
E-mail addresses: fabiomacielpinto@gmail.com (F.M. Pinto), fernandass@ifsc.edu.br (F.S. Schuch), brentano@ifsc.edu.br (D.M. Brentano).

https://doi.org/10.1016/j.resenv.2023.100124
Received 14 February 2023; Received in revised form 2 May 2023; Accepted 11 May 2023
Available online 22 May 2023
2666-9161/© 2023 The Author(s). Published by Elsevier B.V. on behalf of Lishui Institute of Ecology and Environment, Nanjing University. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

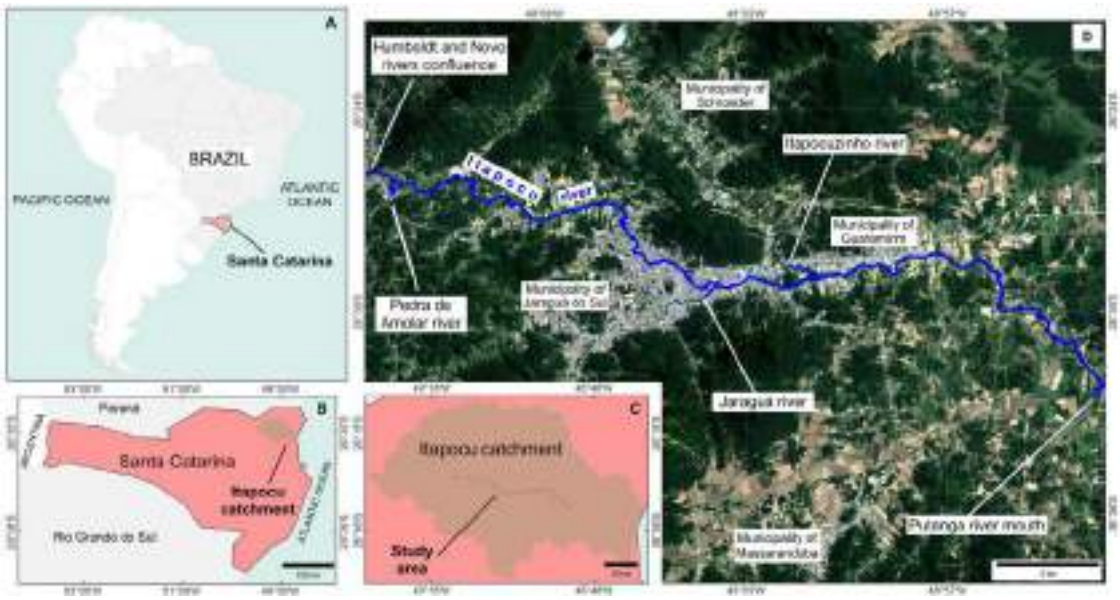


Fig. 1. Location sketch of Santa Catarina (A), Itapocu Catchment (B), study area (C), and RGB composition of Sentinel-2 imagery detailing hydronyms and nearby cities (D).

unbalance the riverscape (Scheidegger, 1973; Vandenberghe, 2003; Buraas et al., 2014; Basso et al., 2015; Deal et al., 2018). Therefore, the leading causes of modification of the riverscape geoforms correspond to transient extreme environmental events, among which are the extreme variations in weather conditions.

Fluvial sensitivity assesses the adjustment potential of a river through the phenomena capable of destabilizing the riverscape, identifying sensitive places that may result in adverse socio-environmental effects, and enabling actions against them (Fryirs, 2017; Kleina and Santos, 2017; Pinto, 2020; Pinto and Weber, 2021). That assessment becomes important because rivers are sensitive to climate change processes but are variably affected according to the physiographic characteristics and the climate context of the riverscapes (Prudhomme et al., 2013a,b).

Projections indicate that the increase in global average temperature is accompanied by an intensification of processes related to the water cycle, including a higher seasonal and interannual variability in precipitation and runoff (IPCC, 2021). In southeast South America, between 1950 and 2020, a progressive temperature increase contributed to a rise in extreme precipitation events frequency (Grimm, 2011; Nunes and Silva, 2013; IPCC, 2021). With a progressively higher incidence of phenomena capable of modifying the riverscapes, rivers will become more sensitive and then be adjusted to new precipitation scenarios.

Evaluating the riverscapes from their modification factors allows the development of geoenvironmental models for territorial, environmental, and natural disaster governance (Silva and Silva, 2016; Fryirs, 2017). Therefore, this study presents the methodological bases and results by analyzing the extreme precipitation events' influence on the riverscape. The objective was to identify the geomorphic adjustments produced by extreme events by integrating pluviometric data for the events' characterization and multitemporal geomorphometric data associated with riverscape.

The paper demonstrates the changes, associated with extreme precipitation events, suffered by the riverscape through methodological procedures that are easily reproducible and adaptable to other environmental contexts. Thus, the document corresponds to a case study that aims to collaborate with improving the sensitivity assessment methodologies, mainly given the worrying scenario of the current climate change and its negative impacts on the fluvial environment.

2. Methods

This section describes the correlation procedures among extreme events, geomorphometric data, and the evaluation of fluvial sensitivity. Statistical methods were performed in the PAST 4.11 software (Hammer et al., 2001). QGIS 3.20 was used to vectorize and measure riverscape geoforms. Along with QGIS, GrADS 2.2.1 was used to spatialize the events.

2.1. Study area

The study area corresponds to a section of the Itapocu River between coordinates 26°25'S / 49°14'W and 26°32'S / 48°52'W. The area is located in the homonymous catchment, in the State of Santa Catarina, in the South Region of Brazil (Fig. 1). It is delimited to the west by the Humbolt and Novo Rivers and to the east by the Putanga River.

The region has a history of natural disasters associated with extreme precipitation events, especially in the summer (Nunes and Silva, 2013; Cardoso et al., 2020). In this season, monthly precipitation reaches 470 mm and fluvial discharge goes up to 188.5 $m^3\ s^{-1}$, while in the winter, monthly rainfall gets 140 mm and fluvial discharge 101.2 $m^3\ s^{-1}$ (Coan et al., 2014; Oliveira et al., 2018).

2.2. Extreme precipitation events

Selected extreme events occurred between 01/30/2019 and 04/15/2019, 11/15/2020 and 12/30/2020, 02/23/2021 and 03/10/2021. Pluviometric data were extracted from the following pluviometers' historical series (from 01/01/2016 to 06/30/2022): 420450903A, 420890601A, 420890603A, 420890606A, 420890607A, 420650403A, 420130701A, and 421060501A. These pluviometers are operated by the National Center for Monitoring and Early Warning Natural Disasters (CEMADEN) (Fig. 2).

From the daily accumulated frequencies of precipitation's historical series, extreme events were classified into heavy rainfall (HR) and persistent rainfall (PR). HR occurs when the daily precipitation value is greater than or equal to the 99th percentile, according to Eq. (1), while PR happens when precipitation is greater than 1 mm in three consecutive days and the three-day moving average (MA) is greater

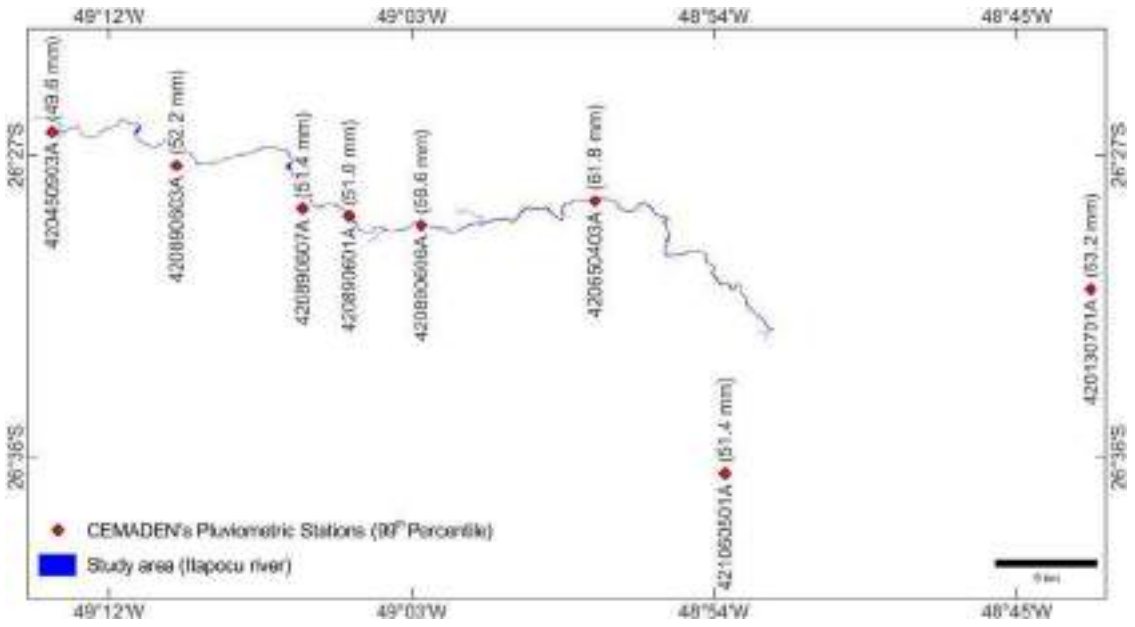


Fig. 2. Pluviometric stations and the respective 99th percentiles obtained from the daily accumulated frequencies of precipitation's historical series (01/01/2016 to 06/30/2022).

than or equal to the 99th percentile, as reported by Eq. (2) (Cardoso et al., 2020).

$$HR = P_d \geq q_n\left(0.99P_d\right) \tag{1}$$

$$PR = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n=3} P_{d(t-n-1)} \geq q_n\left(0.99P_d\right) \tag{2}$$

P_d is the recorded precipitation and q_n $(0.99P_d)$ is the 99th percentile of the historical series.

Ordinary kriging was applied to accumulated frequencies to spatialize events in the study area (Arnon, 1990; Bostan et al., 2012; Charles et al., 2022). Data from MERGE precipitation product, with temporal resolution (TR) of 30' and spatial resolution (SR) of 0.1°, were used to spatialize the events in the catchment (Rozante et al., 2010).

2.3. Geomorphometric procedures

Sentinel-2 bands, provided by European Space Agency (ESA) from 01/30/2019, 04/15/2019, 11/15/2020, 12/30/2020, 02/23/2021 and 03/10/2021 were combined through the Normalized Difference Water Index (NDWI). This index was proposed by McFeeters (1996), according to Eq. (3).

$$NDWI = \frac{B3\,(GREEN) - B8\,(NIR)}{B3\,(GREEN) + B8\,(NIR)} \tag{3}$$

B3 corresponds to the wavelengths from 0.52 to 0.59 μm (green), and B8 from 0.77 to 0.89 μm (near-infrared).

The bands have a spatial resolution (SR) of 10 m and a temporal resolution (TR) of 5 days for the constellation and 10 days for each satellite.

Raster data obtained (SR 10 m) were applied in the riverscape geoforms vectorization. These corresponded to the active river channel, active river bars, and river valley margins. Furthermore, the riverscape was segmented into morphological zones considering changes in the direction and width patterns of the geoforms resulting from landscape anomalies. Vectorization corresponds to the conversion of terrain features identifiable in images, into geometric objects that software can manipulate. Therefore, it transforms a terrain feature into a vector, producing an object that can be applied in geomorphometry.

Identification of adjustments was based on the geomorphometry of these vectorized geoforms and the classification by Brierley and Fryirs (2005) and Fryirs et al. (2009).

Specifically, the geomorphometric data obtained were compared through the temporal relationship between A and B dates, corresponding to 01/30/2019 and 04/15/2019, 11/15/2020 and 12/30/2020, 02/23/2021, and 03/10/2021. Longitudinal sections (LS) were delineated at the mean distance between river margins. Moreover, transverse sections (TS) to the LS and to the river valley were delineated at 100 m intervals. Variations in the width of the channel and bars were measured through Eq. (4). The LS' lateral displacements were measured by considering the river valley margins as fixed over time and subdividing the TS of the valley at the LS intersections. The half-transverse sections to the left (TSl) and right (TSr) of the channel were applied in Eq. (5).

$$G = TS\ B_{0+000} - TS\ A_{0+000} \tag{4}$$

G is the geomorphic adjustment of expansion or narrowing of a riverscape geoform; TS B_{0+000} and TS A_{0+000} are the transverse section measurements for dates B and A.

$$CM = TSh\ B_{0+000} - TSh\ A_{0+000} \tag{5}$$

CM is the geomorphic adjustment of channel migration; TSh B_{0+000} and TSh A_{0+000} are the half-transverse section measurements for dates B and A.

Positive values resulting from Eq. (4) denote the width expansion of the geoform. These geomorphic adjustments were identified as channel expansion (CE) and river bar expansion (BE). CE is the enlargement of the river in response to the dominance of erosive processes on one or both fluvial margins, while BE corresponds to the formation of new bars or the expansion or enlargement of the preexisting ones (Brierley and Fryirs, 2005; Fryirs et al., 2009).

Negative values resulting from Eq. (4) denote the narrowing of the geoform. These geomorphic adjustments were identified as channel narrowing (CN) and river bar narrowing (BN). CN is the shortening in width of the river in response to the imbalance between sediment influx and river erosion processes on one or both fluvial margins, while BN denotes the disappearance and decrease of a bar caused by the erosion (Brierley and Fryirs, 2005; Fryirs et al., 2009) or the stabilization and incorporation of the bar to the floodplains.

In the TSl case, Eq. (5) positive values denote channel migration (CM) to the right of the LS, while negative designate the CM to the left. This relationship is inverse for TSr. CM evaluated through Eq. (5) represents the measurement of a line coincident with TS of A and

Table 1
Heavy rainfall (HR) and Persistent rainfall (PR) events.

Period	Stations	99th Percentile (mm)	Rainy days	HR	Rainfall peak (mm)	PR period	PR period Accumulated precipitation (mm)
1/30/2019 to 4/15/2019	420890607A	51.4	2/11/2019 to 2/23/2019	2/17/2019	55.6	2/15/2019 to 2/19/2019	198.6
	420890601A	51.0			55.6	2/15/2019 to 2/19/2019	194.8
	420890606A	56.6			61.2	2/15/2019 to 2/19/2019	236.8
	420650403A	61.8			88.4	2/15/2019 to 2/19/2019	288.4
	420130701A	53.2			134.8	2/15/2019 to 2/19/2019	291.6
	420890607A	51.4	2/11/2019 to 2/23/2019	2/18/2019	83.8	2/15/2019 to 2/19/2019	198.6
	420890601A	51.0			91.4	2/15/2019 to 2/19/2019	194.8
	420890606A	56.6			118.2	2/15/2019 to 2/19/2019	236.8
	420650403A	61.8			112.2	2/15/2019 to 2/19/2019	288.4
	420130701A	53.2			96.2	2/15/2019 to 2/19/2019	291.6
	420450903A	49.6	4/4/2019 to 4/10/2019	4/7/2019	56.0		
	420890603A	52.2			55.0		
	420890601A	51.0			52.4		
11/15/2020 to 12/30/2020	420890603A	52.2	11/27/2020 to 12/30/2021	11/27/2020	98.0		
	420890607A	51.4			89.6		
	420890601A	51.0			69.2		
	420890606A	56.6			73.0		
	420650403A	61.8			104.8		
	420450903A	49.6		12/5/2020	62.4		
	420130701A	53.2			56.6		
	421060501A	51.4		12/6/2020	60.8		
	420450903A	49.6		12/12/2020	75.4		
	420450903A	49.6		12/29/2020	49.6		
2/23/2021 to 3/10/2021	420450903A	49.6	2/23/2021 to 3/6/2021	2/27/2021	106.4	2/26/2021 to 3/1/2021	221.6
	420890603A	52.2			106.4	2/26/2021 to 3/1/2021	256.2
	420890607A	51.4			104.0	2/26/2021 to 3/1/2021	202.4
	420890601A	51.0			97.4	2/26/2021 to 3/1/2021	177.8
	420890606A	56.6			112.6	2/26/2021 to 3/1/2021	210.8
	420650403A	61.8			101.0	2/26/2021 to 3/1/2021	226.0
	420450903A	49.6		2/28/2021	56.0	2/26/2021 to 3/1/2021	221.6
	420450903A	49.6		3/1/2021	52.0	2/26/2021 to 3/1/2021	221.6
	420890603A	52.2			98.4	2/26/2021 to 3/1/2021	256.2
	420890607A	51.4			51.0	2/26/2021 to 3/1/2021	202.4
	420650403A	61.8			87.8	2/26/2021 to 3/1/2021	226.0
	421060501A	51.4			59.8		
	420450903A	49.6		3/3/2021	75.4		

B, limited by the intersections between the LS and TS of the dates. In the half-transverse sections correlation process, the valley margins were considered relatively unchanged by the extreme events since the objective was to analyze the adjustments in the active river geoforms (active channel and active bars) exclusively.

CM is the river's lateral displacement on the valley floor (Brierley and Fryirs, 2005) toward one of the fluvial margins, causing the channel's position modification concerning the valley margins. These margins restrict the lateral evolution of the river in the valley and correspond to the contact between the fluvial sediments deposited on the valley floor, the adjacent rocky hillslopes, and the sedimentary deposits related to the morphodynamic processes of the slopes (Wheaton et al., 2015).

Moreover, considering that SR reduces the positional accuracy of the geoforms, a 10 m tolerance was established for validating the results. This tolerance pattern is associated with the SR of 10 m of the Sentinel-2 bands (B3 and B8) applied in the methodological procedures.

2.4. Sensitivity analysis

The significance analysis evaluated discrepancies among geomorphometric data of each morphological zone. Discrepancy (alternative hypothesis) represents the anomalies with meaning for sensitivity, indicating that the zone is sensitive. The null hypothesis suggests resilience that implies non-significant adjustments, conferring stability to the riverscape.

Geomorphometric data of A were paired with those of B because they refer to the same environment, with a temporal lapse. The Wilcoxon Signed Rank Test (Wilcoxon, 1945) was applied to the A–B pairs data grouped in the morphological zones, exclusively to the zones associated with geoforms that registered adjustments.

Thus, p *values* < 0.05 were considered significant (Hammer et al., 2001; Hajdukiewicz et al., 2016). Accordingly, zones with these results were deemed Sensitive to the events. Those with insignificant results (p *values* > 0.05) were classified as Stable; the adjustments were insufficient to destabilize the riverscape. The zones with no registered adjustments and whose data were not evaluated using the Wilcoxon Signed Rank Test were considered Insensitive.

3. Results

3.1. Characteristics of the extreme precipitation events

Different thresholds of extreme events were observed for each pluviometric station, denoting variations in the spatial distribution of the precipitation according to the historical series. The 99th percentile of the observations ranged from 49.6 mm in the valley upstream to 61.8 mm downstream (Fig. 2, Table 1).

Between 01/30/2019 and 04/15/2019, HR events took place on 02/17/2019, 02/18/2019, and 04/07/2019, with rainfall peaks recorded in the stations 420130701A (134.8 mm), 420890606A (118.2 mm), and 420450903A (56.0 mm) (Table 1). HR events of 02/17/2019 and 02/18/2019 caused the MA to increase above the 99th percentile thresholds and resulted in PR between 02/15/2019 and 02/19/2019, with 291.6 mm accumulated.

From 11/15/2020 to 12/30/2020, HR occurred on 11/27/2020, 12/05/2020, 12/06/2020, 12/12/2020, and 12/29/2020, with peaks recorded in the stations 420650403A (104.8 mm), 420450903A (62.4

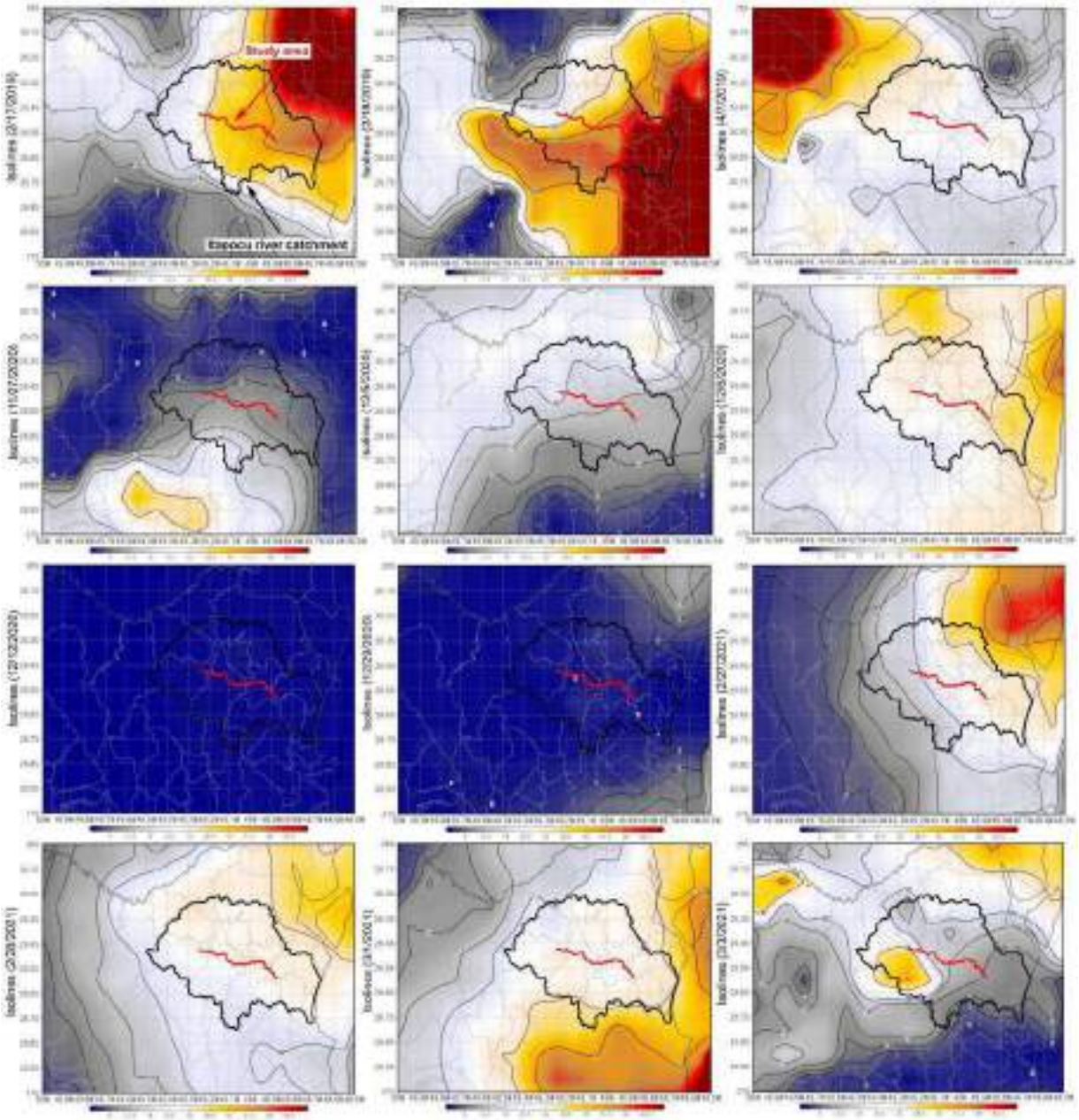


Fig. 3. Precipitation distribution in the Itapocu catchment during Heavy Rainfall (HR) events. Maps created from MERGE data.

mm), 421060501A (60.8 mm), 420450903A (75.4 mm), and 420450903A (49.6 mm).

Between 02/23/2021 and 03/10/2021, HR happened on 02/27/2021, 02/28/2021, 03/01/2021, and 03/03/2021, with peaks in the stations 420890606A (112.6 mm), 420450903A (56.0 mm), 420890603A (98.4 mm), and 420450903A (75.4 mm). HR events of 02/27/2021, 02/28/2021, and 03/01/2021 caused PR between 02/26/2021 and 03/01/2021, accumulating 256.2 mm.

3.2. Spatial distribution of the events and relationship with the adjustments in the riverscape

Precipitation distribution maps obtained by MERGE data denote that rainfall reached the entire catchment and zones on the days HR occurred. However, these extreme events did not extend to the entire catchment (Fig. 3).

Initially, the river valley was subdivided into 52 morphological zones (from Z1 to Z52) (Fig. 4). Then, by ordinary kriging interpolation, it was observed that between 01/30/2019 and 04/15/2019, extreme precipitation events (HR and PR) reached the zones from Z7 to Z52 (02/17/2019), Z1 to Z52 (02/18/2019), and Z1 to Z28 (04/07/2019) (Fig. 5). At that time, the river was about 52,500 meters long and the affected zones represented, respectively, 48,810 m (92,97%), 52,500 m (100.00%), and 22,850 m (43.52%) of the channel.

Between 11/15/2020 and 12/30/2020, HR and PR events impacted from Z1 to Z49 (11/27/2020), Z1 to Z15 (12/05/2020), Z1 to Z8 (12/12/2020), and Z1 to Z4 (12/29/2020). The 12/06/2020 event influenced regions downstream Z52, not affecting the study area. Considering that the average river extension was 52,500 m, at the time the impacted zones represented respectively 49,090 m (93.50%), 10,700 m (20.38%), 5390 m (10.26%), and 2370 m (4.51%).

From 02/23/2021 to 03/10/2021, HR and PR events reached from Z1 to Z52 (02/27/2021), Z1 to Z5 (02/28/2021), Z1 to Z52 (03/01/2021), and Z1 to Z7 (03/03/2021). At that period, the affected zones represented respectively 52,500 m (100.00%), 3050 m (5.80%), 52,500 m (100.00%), and 4050 m (7.71%).

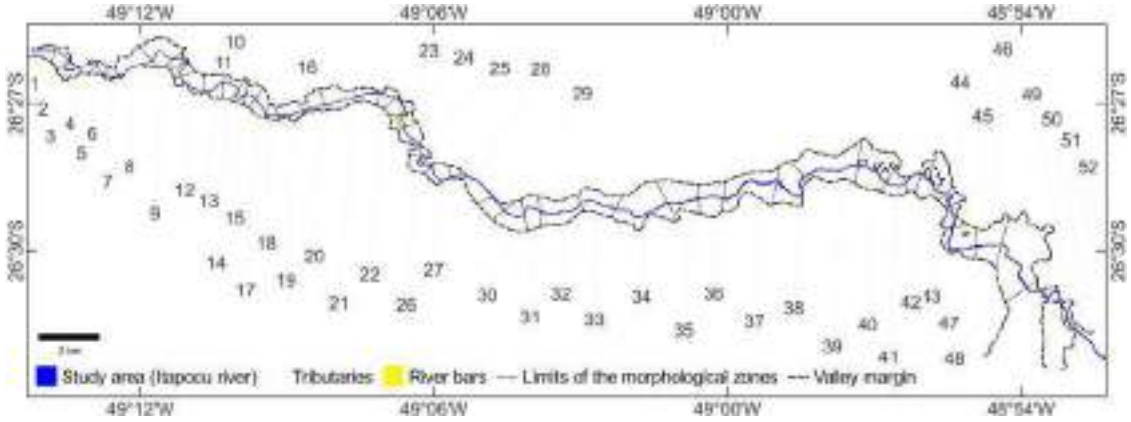


Fig. 4. Morphological zones and valley delimitation.

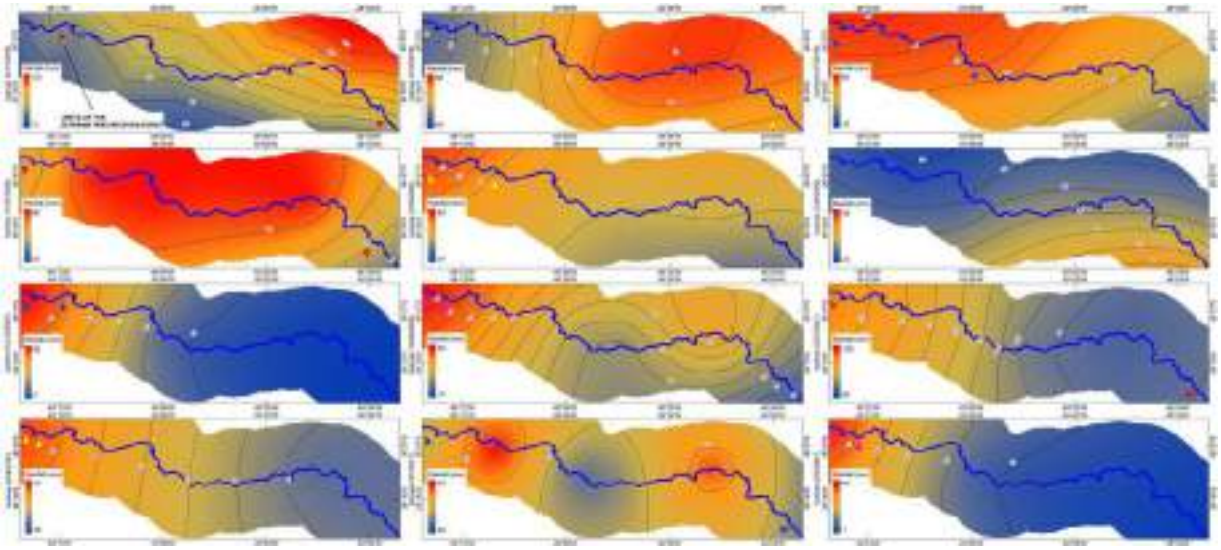


Fig. 5. Extreme precipitation distribution over the study area. Maps created from the ordinary kriging of the precipitation's accumulated frequencies during the extreme events incidence.

Adjustments identified through the riverscape geomorphometry corresponded to channel migration (CM), channel expansion (CE), and channel narrowing (CN). These were related to changes in the geometry and spatial position of the river. Adjustments associated with changes in the geometry of the river bars were river bar expansion (BE) and river bar narrowing (BN) (Fig. 6).

Between 01/30/2019 and 03/10/2021, the Itapocu River presented an average longitudinal extension of 52,500 m. During the incidence of extreme precipitation events from 01/30/2019 to 04/15/2019, the CM affected 37.71% of the river, CE 15.23%, CN 3.04%, BE 0.19%, and BN 1.14%.

From 11/15/2020 to 12/30/2020, CE affected 27.80% of the river, CN 2.66%, CM 2.47%, BN 1.52%, and BE 0.19%.

Between 02/23/2021 and 03/10/2021, CE impacted 19.23% of the river, CM 7.61%, CN 1.71%, BN 0.57%, and BE 0.19%.

3.3. Sensitivity analysis

In the sensitivity analysis with the Wilcoxon Signed Rank Test, river bar adjustments (BE and BN) did not present significant results and were classified as Stable.

In the case of the channel, between 01/30/2019 and 04/15/2019, there were no Insensitive zones. The Stable zones totaled 15, corresponding to 9290 m or 17.69% of the river. Sensitive zones summed 37, corresponding to 43,070 m or 82.03%. Significant adjustments identified in Sensitive zones were CM in 19 zones (21,280 m or 40.53% of the river), CE in 4 (3280 m or 6.24%). CM and CE presented significance for 13 zones (17,450 m or 34.55%), and CM and CN for 1 (1060 m or 2.01%) (Table 2, Fig. 7).

From 11/15/2020 to 12/30/2020, Insensitive zones totaled 13 (9860 m or 18.78%), Stable summed 15 (12,450 m or 23.71%), and Sensitive corresponded to 24 (30,280 m or 57.67%). Significant adjustments were CE for 17 zones (21,640 m or 41.21%), CM for 3 (3700 m or 7.04%), CN for 1 (670 m or 1.27%), and CM and CE for 3 (4270 m or 8.13%).

Between 02/23/2021 and 03/10/2021, Insensitive zones summed 5 (3490 m or 6.64%), Stable zones totaled 19 (15,050 m or 28.66%), and Sensitive ones corresponded to 28 (33,980 m or 64.72%). The adjustments were CE for 9 zones (12,320 m or 23.46%), CM for 8 (8080 m or 15.39%) and CM and CE for 11 (13,580 m or 25.86%).

Considering the three periods, Insensitive and Stable zones corresponded to 10 (5640 m or 10.74% regarding a 52,500 m average longitudinal extension for the river), while 42 zones (46,860 m or 89.25%) were Sensitive in at least one period.

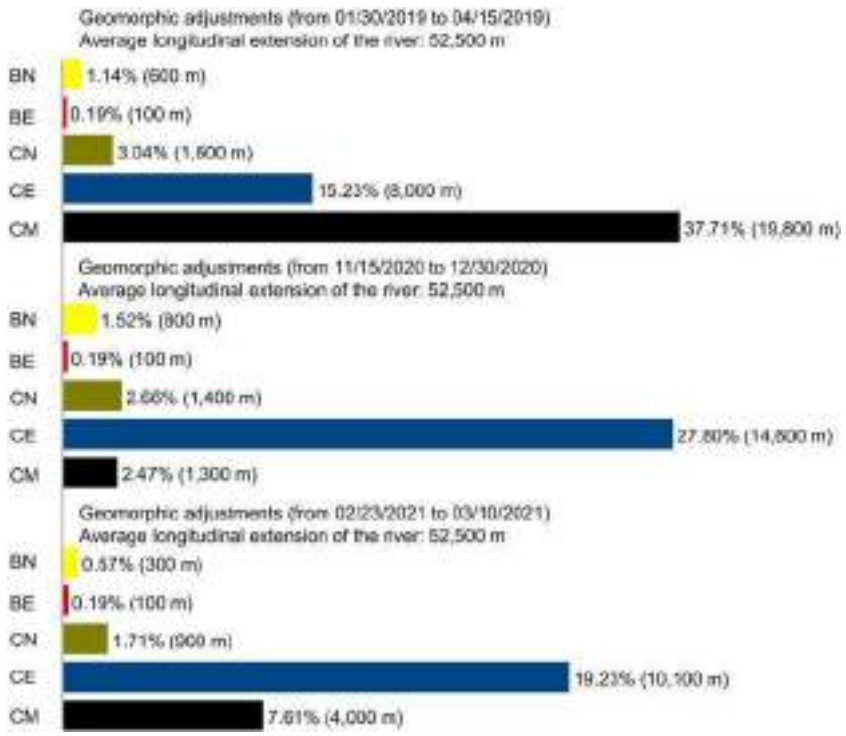


Fig. 6. Representativeness of the geomorphic adjustments of channel migration (CM), channel expansion (CE), channel narrowing (CN), river bar expansion (BE), and river bar narrowing (BN) related to the periods of occurrence of extreme precipitation events.

Table 2
Channel sensitivity according to the morphological zones and occurrence of the adjustments of channel migration (CM), channel expansion (CE), and channel narrowing (CN).

Period	Morphological zone	Test result	Conclusion	Geomorphic adjustment
1/30/2019 to 4/15/2019	1, 2, 6, 7, 10, 11, 15, 16, 18, 23, 24, 26, 35, 44	$p > 0,05$	Stable	No significant adjustment
	3, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	$p < 0,05$	Sensitive	CM–CE
11/15/2020 to 12/30/2020	1, 6, 9, 10, 14, 16, 17, 19, 28, 29, 30, 31, 35		Insensitive	No observed adjustment
	2, 5, 7, 12, 13, 15, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 36, 42	$p > 0,05$	Stable	No significant adjustment
	3, 4, 8, 11, 23, 27, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	$p < 0,05$	Sensitive	CM–CE–CN
2/23/2021 to 3/10/2021	1, 10, 14, 25, 36		Insensitive	No observed adjustment
	2, 6, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 18, 22, 26, 27, 28, 29, 31, 35, 40, 44, 45	$p > 0,05$	Stable	No significant adjustment
	3, 4, 5, 8, 12, 13, 19, 20, 21, 23, 24, 30, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52	$p < 0,05$	Sensitive	CM–CE
1/30/2019 to 4/15/2019, and 11/15/2020 to 12/30/2020, and 2/23/2021 to 3/10/2021	1, 2, 6, 7, 10, 15, 16, 18, 26, 35		Insensitive or Stable	No observed or significant adjustment
	3, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52		Sensitive	Significant adjustment in at least one period

4. Discussion

4.1. Relationship between extreme precipitation events and geomorphic adjustments in the study area

Significant geomorphic adjustments in the riverscape were channel migration (CM), channel expansion (CE), and channel narrowing (CN). These were classified according to Brierley and Fryirs (2005) and Fryirs et al. (2009), which list and define general forms of geomorphic adjustments in the river landscape. Although riverscapes have environmental particularities, these general definitions are useful for identifying adjustments and can be expanded or adapted to the local fluvial context.

The geomorphic adjustments identified were due to extreme precipitation events of heavy rainfall (HR) and persistent rainfall (PR). As demonstrated (Scheidegger, 1973; Vandenberghe, 2003; Buraas et al., 2014; Basso et al., 2015; Deal et al., 2018), extreme variations in weather conditions correspond to one of the main causative agents of geomorphic adjustments, being responsible for rapid changes in the morphodynamic sculpting processes of the riverscape.

Nonetheless, the MERGE and pluviometric stations data denoted variations in the rainfall and extreme events distribution. They affected

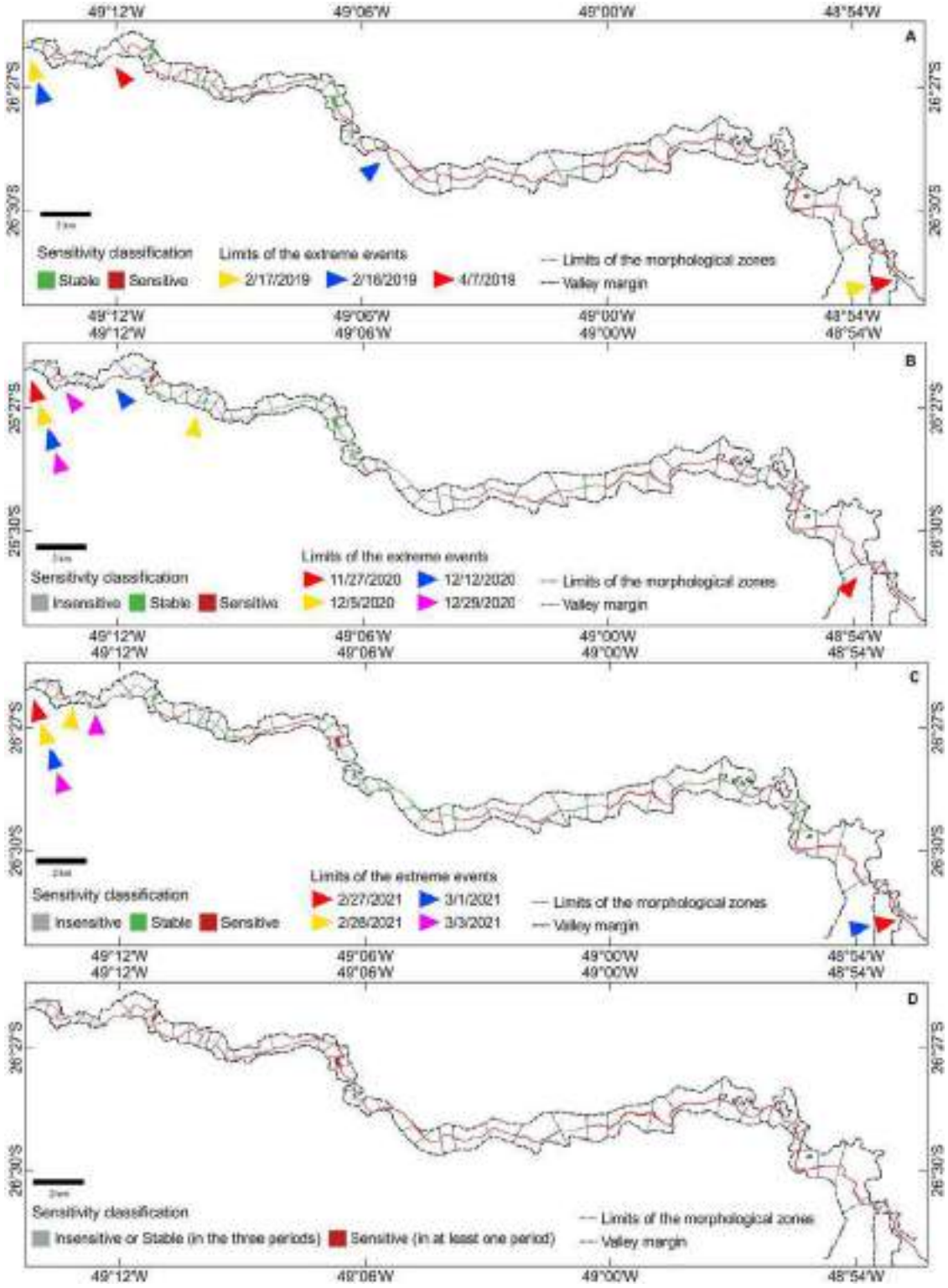


Fig. 7. Channel sensitivity to the events from 01/30/2019 to 04/15/2019 (A); 11/15/2020 to 12/30/2020 (B); 02/23/2021 to 03/10/2021 (C); and Insensitive or Stable in the three periods and Sensitive in at least one period (D).

89.25% of the river (Sensitive case), while 10.74% were Insensitive or Stable cases.

Variations in channel sensitivity were observed in every period. From 01/30/2019 to 04/15/2019, Sensitive zones corresponded to 82.03% of the river. The highest HR peak during this period occurred on 02/17/2019 (134.8 mm), and the highest accumulated precipitation in the PR was between 02/15/2019 and 02/19/2019 (291.6 mm). From 11/15/2020 to 12/30/2020, Sensitive zones corresponded to 57.67%. The most significant record of HR happened on 11/27/2020 (104.8 mm) without a PR record. Between 02/23/2021 and 03/10/2021, Sensitive zones corresponded to 64.72%. The highest HR peak was on 02/27/2021 (112.6 mm), with 256.2 mm accumulated in the PR between 02/26/2021 and 03/01/2021.

The extreme precipitation events of HR and PR, according to Cardoso et al. (2020) definitions, correspond respectively to the event of up to 1 day that exceeds the threshold of the 99th percentile of the precipitation observations and to the event whose three-day moving average (MA) exceeds the threshold of the 99th percentile. The use of percentiles in the pluviometric stations' historical series correspond to an efficient method for determining short-duration extreme events, mainly in catchment and river valley scales. By combining extreme events with data extracted from remote sensing products, precipitation data from products such as MERGE, and spatialized events from interpolation techniques such as kriging, we obtained an efficient method to identify and attribute origin to the geomorphic adjustments.

Deal et al. (2018) indicated that extreme events modify the landscape according to intensity and persistence. Considering that the extreme events variably reached the study area, the results denoted that the intensity, regarding precipitation volume and persistence over time, influenced riverscape adjustments and sensitivity. Therefore, the higher the intensity and persistence, the greater the possibility of significant adjustments along the river.

Vandenberghe (2003) considered that valley substrate geological structures difficult the correlations between the sculpting agents associated with weather and the morphodynamic processes. This correlation is complicated when the climate context does not produce extreme events capable of affecting the river's water regime (Scheidegger, 1973; Basso et al., 2015). The stability and insensitivity of certain morphological zones are probably associated with geological structures or variations in the lithological composition of the substrate. These may attribute local resistance and stability to the riverscape, resulting in a low capacity to produce significant geomorphic responses in spite of extreme precipitation events.

Sensitivity is the product of the stress imposed on the environment, resulting in the reorganization of the landscape geoforms (Fryirs, 2017). The term reflects the recognizable and significant alterations produced by these stressing phenomena, which are not temporally isolated but occur in a dynamic context (Brunsden and Thornes, 1979; Menegat and Fernandes, 1994) that overlays disturbance layers that stimulate landscape changes over time.

Significant alterations in the landscape derive from processes that can produce changes in the river's base levels, such as climate and tectonic (Schumm, 1979, 1993). This work aimed to analyze rainfall as a destabilizing factor to the riverscape, concluding that the Itapocu River was variably Sensitive to extreme precipitation events. It means that the riverscape responded actively to the stress imposed by the phenomena and that a factor associated with the climate caused imbalances in the riverscape, culminating in significant geomorphic adjustments.

Accordingly, rivers respond differently to extreme events and climate change. They are products of heterogeneous climate interactions such as phytophysiognomy and substrate structures (Prudhomme et al., 2013a,b; Basso et al., 2015; Deal et al., 2018). This complexity hinders sensitivity assessment and produces a variety of riverscape responses (Lisenby et al., 2020). Recognizing the causes and geomorphic responses is vital to understanding the sensitivity in each fluvial environment (Santos and Marçal, 2021), denoting the need to bring assessment models closer to the realities imposed by environment heterogeneities. Thus, the research demonstrated that through simple methods such as geomorphometry, interpolation, spatialization of precipitation, and analysis of the geomorphic adjustments' statistical significance, it becomes possible to determine the sensitivity of the riverscape to extreme precipitation events. Furthermore, it demonstrated that it is possible to improve the identification of geomorphic adjustments through geomorphometry of the riverscape geoforms.

4.2. Study limitations and directions for further research

Limitations are imposed by spatial resolution (SR) that reduces the positional accuracy of vectorized geoforms and embeds errors in geomorphometry. Accuracy indicates the proximity between the geospatial information and the terrain (Tolentino et al., 2017). It is recommended that tolerance parameters be established according to the research objectives to reduce errors (Tolentino et al., 2017) because low accuracy implies a lower potential for detecting landscape adjustments. It results in a less efficient sensitivity analysis.

Precipitation products such as MERGE have limited applications in landscape adjustments analysis due to the SR, yet they are applicable in the regional contextualization of precipitation phenomena. The analysis in the scale of geoforms demands a detail that pluviometric stations can provide. Interpolation of these data allows uncertainty reduction regarding the precipitation distribution, producing variable quality results according to the network of stations used (Arnon, 1990; Charles et al., 2022). This spatialization is desirable due to variations in the geographical distribution of phenomena, which may not be reflected in products such as MERGE.

The temporal resolution (TR) is a limiting factor to landscape multitemporal analysis and is worsened by obstruction effects, such as cloud cover (Boothroyd et al., 2020). Short-duration extreme events, limited to days, need low-obstruction effects and high TR to reduce the resilience effect and enable the multitemporal evaluation. This effect corresponds to the capacity of the system to return to prior conditions to the disturbance (Hohensinner et al., 2014; Phillips and Dyke, 2016). The Sentinel-2 bands applied in the methodological procedures have SR of 10 m and TR of 5 days for the constellation and 10 days for each satellite. The TR is appropriate for the multitemporal evaluation and the analysis of the effects of extreme precipitation events on the riverscape. However, the SR may difficult the use of Sentinel-2 products in research, whose study object requires high spatial resolutions. In these cases, it is necessary to previously analyze the dimensions of the study object and assess whether Sentinel-2 products can provide sufficiently accurate geospatial data.

5. Conclusion

The research investigated the correlation between geomorphic adjustments in the riverscape and the incidence of extreme precipitation events. For this, Sentinel-2 images were used to vectorize the riverscape geoforms and a geomorphometric and statistical method was designed to measure the river geoforms and evaluate the fluvial sensitivity to extreme events.

Thus, it was concluded that the Itapocu River channel was primarily Sensitive (89.25%) to extreme precipitation, while 10.74% was Insensitive or Stable to these events. Significant geomorphic adjustments involved channel expansion (CE), channel narrowing (CN), and channel migration (CM). Adjustments identified in the river bars were river bar expansion (BE) and river bar narrowing (BN). However, the sensitivity verified that these adjustments were not statistically significant and the bars remained Stable. It means that the channel responded actively to the environmental stress imposed by extreme precipitation events.

The statistics corroborated with the sensitivity analysis and the spatialization of the Sensitive areas of the fluvial environment. The results indicated the geographical non-uniformity of the riverscape responses to extreme events. The thresholds associated with the 99th percentile of the pluviometric stations' historical series denote variations in the precipitation intensity in a relatively small area. These variations may explain the non-uniformity of the spatial distribution and the differences in the statistical significance of the geomorphic adjustments.

Therefore, these events influence the sculpting processes but vary according to the intensity and persistence of the extremes. In this context, the sensitivity will follow these variations. Thus, the more intense the extreme event is concerning precipitation volume, and the longer its duration, the greater the impact on the fluvial environment. Therefore, extreme rainfall events with high precipitation volumes concentrated in a few days can produce significant geomorphic adjustments in the riverscape.

Some limitations for future research may correspond to the spatial and temporal resolution of pluviometric and remote sensing products. Data extracted from products with low resolutions may reduce the positional accuracy of the geoforms, hindering the multitemporal analysis of the riverscape and imposing obstacles to the spatialization of the extreme precipitation events.

References

Arnon, K., 1990. Application of kriging technique to areal precipitation mapping in arizona. Geojournal 22 (4), 391–398. http://dx.doi.org/10.1007/BF00174760.

Basso, S., Frascati, A., Marani, M., Schirmer, M., Botter, G., 2015. Climatic and landscape controls on effective discharge. Geophys. Res. Lett. 42 (20), 8441–8447. http://dx.doi.org/10.1002/2015GL066014.

Boothroyd, R.J., Williams, R.D., Hoey, T.B., Barrett, B., Prasojo, O.A., 2020. Applications of google earth engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change. Wiley Interdiscip. Rev. Water 8, e21496. http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1496.

Bostan, P.A., Heuvelink, G.B.M., Akyurek, S.Z., 2012. Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf. 19, 115–126. http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.010.

Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2005. Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework. Blackwell Publishing, Oxford, http://dx.doi.org/10.1002/9780470751367.

Brierley, G., Fryirs, K., Marçal, M., Lima, R., 2019. The use of the river styles framework as a tool to 'work with nature' in managing rivers in Brazil: Examples from the macaé catchment. Rev. Bras. Geomorfol. 20 (4), 751–771. http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1559.

Brunsden, D., Thornes, J.B., 1979. Landscape sensitivity and change. Trans. Inst. Br. Geogr. 4 (4), 463–484. http://dx.doi.org/10.2307/622210.

Buraas, E.M., Renshaw, C.E., Magilligan, F.J., Dade, W.B., 2014. Impact of reach geometry on stream channel sensitivity to extreme floods. Earth Surf. Process. Landf. 39, 1778–1789. http://dx.doi.org/10.1002/esp.3562.

Cardoso, C.S., Quadro, M.F.L., Bonetti, C., 2020. Persistência e abrangência dos eventos extremos de precipitação no sul do brasil: Variabilidade espacial e padrões atmosféricos. Rev. Bras. Meteorol. 35 (2), 219–231. http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786352031.

Charles, T.S., Lopes, T.R., Duarte, S.N., Nascimento, J.G., Ricardo, H.C., Pacheco, A.B., 2022. Estimating average annual rainfall by ordinary kriging and TRMM precipitation products in midwestern Brazil. J. South Am. Earth Sci. 118, 103937. http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103937.

Coan, B.D.P., Back, A.J., Bonetti, A.V., 2014. Precipitação mensal e anual provável no Estado de Santa Catarina. Rev. Bras. Climatol. 15, 122–142. http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v15i0.38348.

Crosby, B.T., Whipple, K.X., 2006. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa river, north island, new zealand. Geomorphology (Amst) 82, 16–38. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.023.

Deal, E., Botter, G., Braun, J., 2018. Understanding the role of rainfall and hydrology in determining fluvial erosion efficiency. J. Geophys. Res. Earth Surf. 123 (4), 744–778. http://dx.doi.org/10.1002/2017JF004393.

Downs, P.W., Gregory, K.J., 1995. Approaches to river channel sensitivity. Prof. Geogr. 47, 168–175. http://dx.doi.org/10.1111/j.0033-0124.1995.00168.x.

Fryirs, K.A., 2017. River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. Earth Surf. Process. Landf. 42, 55–70. http://dx.doi.org/10.1002/esp.3940.

Fryirs, K.A., Spink, A., Brierley, G., 2009. Post-European settlement response gradients of river sensitivity and recovery across the upper hunter catchment, Australia. Earth Surf. Process. Landf. 34, 897–918. http://dx.doi.org/10.1002/esp.1771.

Grimm, A.M., 2011. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 25, 537–554. http://dx.doi.org/10.1007/s00477-010-0420-1.

Hajdukiewicz, H., Wyżga, B., Mikuś, P., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A., 2016. Impact of a large flood on mountain river habitats, channel morphology, and valley infrastructure. Geomorphology (Amst) 272, 55–67. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.003.

Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontol. Electron. 4 (1), 1–9.

Hohensinner, S., Jungwirth, M., Muhar, S., Schmutz, S., 2014. Importance of multi-dimensional morphodynamics for habitat evolution: Danube river 1715–2006. Geomorphology (Amst) 215, 3–19. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.001.

Holbrook, J., Schumm, S.A., 1999. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. Tectonophysics 305, 287–306. http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00011-6.

IPCC, 2021. Climate change 2021: The physical science basis. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçiv, O., Yu, R., Zhou, B. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, http://dx.doi.org/10.1017/9781009157896.

Kleina, M., Santos, L.J.C., 2017. Sensitividade fluvial da drenagem principal da bacia hidrográfica do Rio Sagrado – serra do mar paranaense. Raega 41, 174–188. http://dx.doi.org/10.5380/raega.

Lisenby, P.E., Fryirs, K.A., Thompson, C.J., 2020. River sensitivity and sediment connectivity as tools for assessing future geomorphic channel behavior. Int. J. River Basin Manag. 18 (3), 279–293. http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2019.1672705.

Llena, M., Vericat, D., Martínez-Casasnovas, J.A., Smith, M.W., 2020. Geomorphic adjustments to multi-scale disturbances in a mountain river: A century of observations. Catena (Amst) 192, 104584. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2020.104584.

McFeeters, S.K., 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. Int. J. Remote Sens. 17 (7), 1425–1432. http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714.

Menegat, R., Fernandes, L.A.D., 1994. O método da investigação científica na geologia: a abordagem através do exemplo heurístico da caixa-preta. Rev. Bras. Geosci. 24 (3), 177–188.

Nunes, A.B., Silva, G.C., 2013. Climatology of extreme rainfall events in eastern and northern Santa Catarina state, Brazil: present and future climate. Rev. Bras. Geofis. 31 (3), 413–425. http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v31i3.314.

Oliveira, J.C., Aguiar, W., Cirano, M., Genz, F., Amorim, F.N., 2018. A climatology of the annual cycle of river discharges into the Brazilian continental shelves: from seasonal to interannual variability. Environ. Earth Sci. 77, 192. http://dx.doi.org/10.1007/s12665-018-7349-y.

Phillips, J.D., Dyke, C.V., 2016. Principles of geomorphic disturbance and recovery in response to storms. Earth Surf. Process. Landf. 41, 971–979. http://dx.doi.org/10.1002/esp.3912.

Pinto, F.M., 2020. Depósitos minerais e previsão de impactos ambientais: os modelos genéticos perau e panelas no Estado do Paraná (Brasil). Rev. Bras. Meio Ambient. 8 (1), 70–86. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3612302.

Pinto, F.M., Brentano, D., Schuch, F.S., 2021. Caracterização morfológica de um trecho do rio itapocu, região norte de santa catarina: Subsídios para a identificação de áreas de risco geomórfico. Estrab 2, 170–179. http://dx.doi.org/10.53455/re.v2i.40.

Pinto, F.M., Weber, C., 2021. Diagnóstico de uma usina de asfalto: subsídios à avaliação de impactos ambientais através do levantamento histórico e do mapeamento de riscos. Discipl. Sci. Nat. Tecnol. 22 (1), 81–98. http://dx.doi.org/10.37779/nt.v22i1.3743.

Prudhomme, C., Crooks, S., Kay, A.L., Reunard, N., 2013a. Climate change and river flooding: part 1 classifying the sensitivity of British catchments. Clim. Change 119, 933–948. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0748-x.

Prudhomme, C., Crooks, S., Kay, A.L., Reunard, N., 2013b. Climate change and river flooding: part 2 sensitivity characterization for british catchments and example vulnerability assessments. Clim. Change 119, 949–964. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0726-3.

Reid, H.E., Brierley, G.J., 2015. Assessing geomorphic sensitivity in relation to river capacity for adjustment. Geomorphology (Amst) 251, 108–121. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.009.

Rozante, J.R., Moreira, D.S., Gonçalves, L.G.G., Vila, D.A., 2010. Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over south America. Weather Forecast. 25 (3), 885–894. http://dx.doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1.

Santos, R.C., Marçal, M.S., 2021. Caracterização dos ajustes e mudanças na morfologia do rio São João, região das baixadas litorâneas do estado do Rio de Janeiro. Rev. Bras. Geomorfol. 22 (1), 149–162. http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1826.

Scheidegger, A.E., 1973. Hydrogeomorphology. J. Hydrol. 20 (3), 193–215. http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(73)90061-9.

Schumm, S.A., 1979. Geomorphic thresholds: the concept and its applications. Trans. Inst. Br. Geogr. 4 (4), 485–515. http://dx.doi.org/10.2307/622211.

Schumm, S.A., 1993. River response to baselevel change: implication for sequence stratigraphy. J. Geol. 101 (2), 279–294. http://dx.doi.org/10.1086/648221.

Silva, A.C., Silva, O.G., 2016. Análises dos padrões e estilos de canais a partir da paisagem geomorfológica fluvial na bacia do rio una/PE. R. Cerrados 14 (2), 71–92. http://dx.doi.org/10.22238/rc24482692v14n22016p71a92.

Tolentino, F.M., Silva, C.R., Santil, F.L.P., 2017. Avaliação da acurácia posicional de redes de drenagem obtidas a partir de modelos SRTM e ASTER com o uso dos softwares ARCGIS e QGIS. Rev. Bras. Cartogr. 69 (7), 1287–1301. http://dx.doi.org/10.14393/rbcv69n7-43989.

Vandenberghe, J., 2003. Climate forcing of fluvial system development: an evolution of ideas. Quat. Sci. Rev. 22 (20), 2053–2060. http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00213-0.

Wheaton, J.M., Fryirs, K., Brierley, G., Bangen, S.G., Bouwes, N., O'Brien, G., 2015. Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms. Geomorphology (Amst) 248, 273–295. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.010.

Wilcoxon, F., 1945. Individual comparisons by ranking methods. Biom. Bull. 1 (6), 80–83. http://dx.doi.org/10.2307/3001968.