

MODELAGEM DE CONECTIVIDADE ESTRUTURAL E FUNCIONAL NO ALTO CURSO DO RIO PIRANHAS, REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA

Structural and Functional Connectivity Modelling in the Upper Piranhas River Basin, Brazilian Semi-arid Region

Jeferson Mauricio Rodrigues

Mestrando em Geografia pela Universidade Federal da Paraíba, Brasil

jefersonmrgeo@gmail.com

Jonas Otaviano Praça de Souza

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

jonas.souza@academico.ufpb.br

Recebido: 15/03/2025

Aceito: 10/05/2025

Resumo

A conectividade da paisagem expressa como os compartimentos geomorfológicos interagem na transferência de água, sedimentos e nutrientes. Este estudo analisa a relação entre conectividade estrutural e funcional com os estilos fluviais do alto curso do rio Piranhas, no semiárido paraibano. A conectividade estrutural foi avaliada por variáveis como gradiente, rugosidade e distância, estimando o potencial de deslocamento hidrossedimentar. A conectividade funcional foi aplicada em trechos fluviais com dados de RPA e modelagens hidrodinâmicas em HEC-RAS. A integração das abordagens permitiu analisar erosão, deposição e escoamento superficial em drenagens intermitentes. Os resultados indicam forte influência de fatores topográficos, uso do solo e impactos antrópicos na conectividade. A abordagem contribui para o entendimento da dinâmica hidrossedimentológica e o planejamento em áreas sensíveis à variabilidade climática.

Palavras-chave: Conectividade estrutural e funcional, Estilos fluviais, Semiárido.

Abstract

Landscape connectivity refers to the interaction between geomorphological compartments in the transfer of water, sediments, and nutrients. This study analyses the relationship between structural and functional connectivity and the fluvial styles of the upper Piranhas River, in the semi-arid region of Paraíba, Brazil. Structural connectivity was assessed using variables such as slope, roughness, and distance to estimate hydro-sediment transport potential. Functional connectivity was applied to river reaches using UAV data and hydrodynamic modelling in HEC-RAS. The integration of both approaches enabled the analysis of erosion, deposition, and surface runoff in intermittent drainages. Results indicate a strong influence of topographic factors, land use, and anthropogenic impacts on connectivity. This approach contributes to understanding hydro-sediment dynamics and supports environmental planning in areas sensitive to climate variability.

Keywords: Structural and functional connectivity; Fluvial styles; Semi-arid region.

1. INTRODUÇÃO

A conectividade refere-se ao acoplamento de diferentes compartimentos da paisagem (Calle *et al.*, 2020; Hooke; Souza; Marchamalo, 2021; Lexartza-Artza; Wainwright, 2009; Tetzlaff *et al.*, 2007; Wohl *et al.*, 2019) que podem estar conectados ou não a partir de eventos geradores de transmissão de energia e matéria que passam em um ponto na superfície, como também, considera a conectividade entre encosta e canal fluvial (Almeida; Correa, 2020; Bracken; Croke, 2007; Brierley; Fryirs; Jain, 2006; Jiao *et al.*, 2020). A conectividade pode ser dividida entre estática/estrutural e dinâmica/funcional (Borselli; Cassi; Torri, 2008; Bracken *et al.*, 2013; Okin *et al.*, 2015; Wainwright *et al.*, 2011; Wohl *et al.*, 2019).

A conectividade estrutural trata sobre o potencial de conexão que uma área apresenta a partir dos elementos físicos constituintes (unidades de paisagem – em diferentes escalas) de uma área em um determinado momento e que podem influenciar nos padrões de transferência de fluxo (Turnbull; Wainwright; Brazier, 2008), ou seja, a condição estática da paisagem. Esse tipo de abordagem em conectividade demonstra a importância de considerar os controles topográficos na (des)conectividade (Hooke; Souza; Marchamalo, 2021; Lexartza-Artza; Wainwright, 2009; Souza; Branco, 2021).

A conectividade funcional trata a paisagem como algo em constante mudança, o que pode gerar não linearidades na dinâmica hidrológica (Bracken; Croke, 2007; Okin *et al.*, 2015; Wohl *et al.*, 2019). No entanto, os elementos que definem os aspectos dinâmicos/funcionais da conectividade são mais difíceis de medir e quantificar, especialmente em zonas semiáridas, onde os dados de precipitação, escoamento e vazão são geralmente escassos (Bracken; Cox; Shannon, 2008; Souza; Branco, 2021). A conectividade dinâmica preocupa-se em determinar os processos reais que operam na produção de fluxos de água, sedimentos e nutrientes. Considerando que os processos hidrológicos são sequências de ações que podem gerar alterações geomórficas em um determinado período, pode-se capturar a dinâmica evolutiva pela qual os sistemas fluviais operam (Brierley; Fryirs, 2013; Calle *et al.*, 2020; Nadeau; Rains, 2007; Rodrigues; Souza; Xavier, 2021).

As conectividades estrutural e funcional não são excludentes, mas complementares, pois um sistema geomorfológico não pode funcionar com elementos completamente independentes (morfologia e processo), mas coletivamente eles funcionam em relação à dinâmica de processo-resposta que varia no espaço e no tempo (Poeppel; Keesstra;

Maroulis, 2017). Dessa maneira, vai depender do objetivo das pesquisas acerca da temática. Por exemplo, em um estudo que busca compreender a influência momentânea da estrutura de uma bacia hidrográfica nas conexões dos compartimentos da paisagem é mais eficaz utilizar modelos de conectividade estrutural. Entretanto, para acompanhar a dinâmica evolutiva da paisagem e a cascata de sedimentos, busca-se entender os processos operantes e reais de uma área, sendo necessário recorrer à conectividade funcional (Wohl *et al.*, 2019). A conectividade sedimentar, ou cascata de sedimentos é o processo de deslocamento de partículas entre diferentes compartimentos de uma paisagem, ocorrendo sobre a estrutura física do terreno e dependente da velocidade do escoamento superficial para ser movimentado entre a rede de drenagem ou entre encosta e canal (Poeppl; Keesstra; Maroulis, 2017; Zhao *et al.*, 2023).

Um compartimento de uma paisagem pode estar conectado, desconectado e não conectado. O momento conectado ocorre quando a ligação entre matéria e energia é livre e permanente; desconectado ocorre quando a ligação entre os compartimentos da paisagem é interrompida temporariamente devido algum impedimento; e não conectado ocorre quando não há ligação entre os compartimentos em razão de descontinuidades nos processos (Bracken; Croke, 2007; Calle *et al.*, 2020).

Além das questões climáticas, para entender a conectividade hidrológica em uma bacia hidrográfica, deve-se levar em consideração variáveis como uso e ocupação da superfície, litologia e topografia (JIAO *et al.*, 2020). A maneira como uma tempestade interage com os outros elementos vai definir o potencial de ocorrer um escoamento superficial (Bracken *et al.*, 2013).

É importante destacar que a ideia de dinâmica subsuperficial de saturar para depois gerar escoamento não é o padrão da dinâmica natural de terras secas, as quais respondem diretamente à intensidade dos eventos chuvosos, que geralmente superam a velocidade de infiltração e geram escoamento superficial antes da saturação do solo (Lima *et al.*, 2021). Essas condições pretéritas são definidas como condições antecedentes (Bracken *et al.*, 2013; Bracken; Croke, 2007). Por outro lado, nas drenagens intermitentes de leito poroso, predominantes nas áreas secas, os primeiros eventos de chuva mal distribuídos temporalmente e espacialmente irão gerar vazão inferior a um mesmo volume de chuva após alguns dias ou meses decorridos da estação chuvosa, pois o sistema estará com sua zona hiporreica saturada, o que inibe a perda de transmissão de água por infiltração e permite o deslocamento de sedimentos por maiores distâncias (Lima *et al.*, 2021).

Esses escoamentos apresentam picos de fluxo variável, pois ainda dependem da inclinação da superfície e do material constituinte do solo. Da mesma maneira, as ligações longitudinais dependem da interação entre os elementos constituintes da paisagem, tendo em vista que litologias sedimentares em superfícies planas favorecem processos de infiltração e geram desconexão natural. No entanto, esse tipo de análise ainda está encoberto por lacunas sobre como analisar e acompanhar os processos existentes a partir da relação dessas variáveis, especialmente em terras secas (Bracken *et al.*, 2013).

Os impactos antrópicos na cobertura da terra, topografia e corredores fluviais alteraram a conectividade em diversas paisagens (FRYIRS, 2013; JIAO *et al.*, 2020). Dessa maneira, os impactos antrópicos podem ser diretos e indiretos, além de temporários ou permanentes, como por exemplo, a construção de uma barragem que pode desconectar permanentemente compartimentos de uma paisagem no sentido montante-jusante e causando agradação à montante e erosão a jusante do trecho impactado (direto) (Bracken *et al.*, 2013), ou a retirada/substituição de cobertura natural da terra para uso, compactando-a e aumentando a possibilidade de gerar mais escoamento superficial e perda rápida de energia no sistema (Costigan *et al.*, 2016), o que pode potencializar os processos de escoamento superficial e erosão superficial (indireto) (Poepl; Keesstra; Maroulis, 2017).

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar o processo geomorfológico predominante em diferentes estilos fluviais no alto curso do rio Piranhas, ambiente semiárido no Sertão do Estado da Paraíba.

2. ÁREA DE ESTUDO

O alto curso do rio Piranhas possui extensão de 121 km ocupando uma área de 1548 km², com uma amplitude altimétrica de 670 m, com uma altitude mínima de 206 m na foz da bacia e uma máxima de 900 próxima às zonas de cabeceira (Figura 1). De acordo com Rodrigues (2020), a bacia do alto curso do rio Piranhas possui chuvas concentradas entre janeiro e abril, sendo dezembro o mês correspondente à pré-estação chuvosa da quadra chuvosa, e com uma média anual de 900 mm.

As rochas que compõem o substrato da bacia do alto curso do rio Piranhas variam do Fanerozóico ao Arqueado, com predomínio de rochas do Proterozóico. As zonas mais rebaixadas da bacia do rio Piranhas é onde ocorre o predomínio das rochas mais

recentes enquanto as superfícies mais elevadas e de transição são as mais antigas. Além disso, o direcionamento da rede drenagem é condicionado pelas grandes estruturas de deformação dúctil e rúptil de direção preferencial NE-SW e E-W, sendo provocadas pelo condicionamento litoestrutural do relevo desenvolvidas desde o final do Ciclo Brasileiro (Cordeiro *et al.*, 2024).

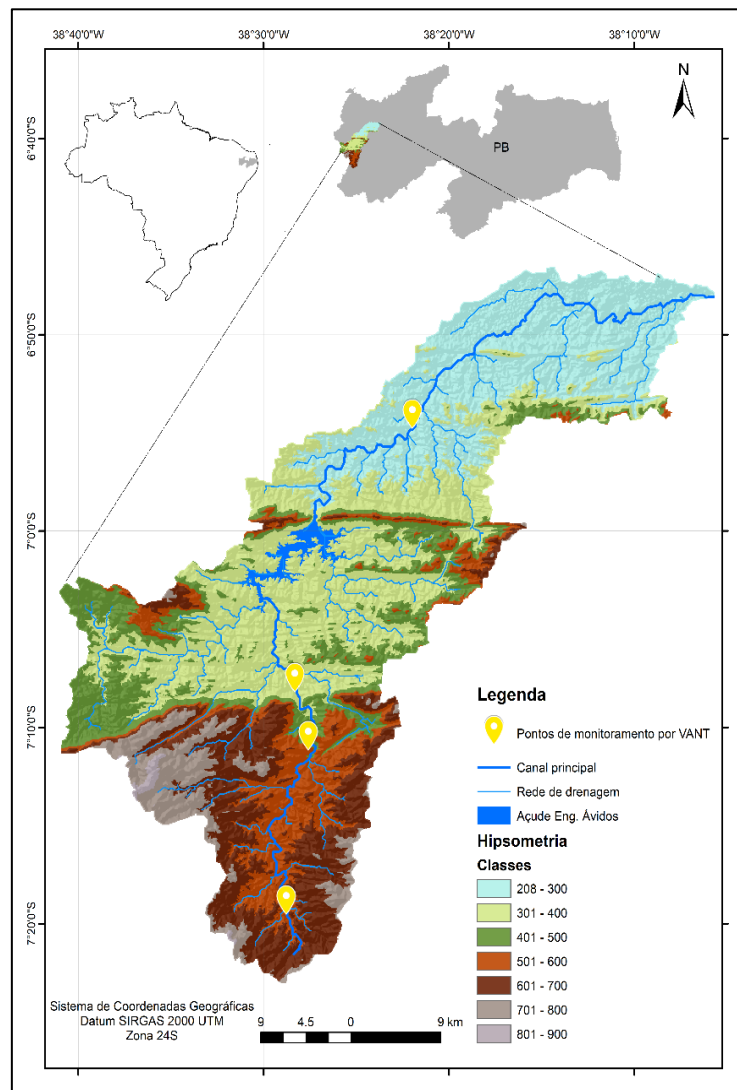


Figura 1 – Mapa de localização do alto curso do rio Piranhas.
Elaboração: autores (2025).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A abordagem integrada da conectividade da paisagem nesta pesquisa envolve a análise conjunta da conectividade estrutural e funcional, permitindo compreender tanto o potencial de escoamento em escala de bacia quanto os processos hidrossedimen-

tológicos em trechos específicos de rios. A conectividade estrutural fornece uma visão geral do deslocamento potencial de sedimentos e água, considerando fatores como rugosidade, gradiente e distância em toda a bacia hidrográfica, caracterizando um modelo contínuo e independente de variações hidrológicas temporais. No entanto, essa abordagem não capta as dinâmicas reais do transporte sedimentar e das interações fluviais ao longo do tempo. Para complementar essa análise, a conectividade funcional é aplicada a trechos específicos que serão definidos a partir da metodologia de estilos fluviais, avaliando diretamente a dinâmica de erosão e deposição por meio de dados de alta resolução obtidos por RPA e modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS. Dessa forma, enquanto a conectividade estrutural estabelece um modelo potencial de deslocamento, a conectividade funcional permite verificar como esses fluxos efetivamente ocorrem e se distribuem espacialmente na rede de drenagem, possibilitando uma compreensão mais detalhada da conectividade hidrossedimentológica no ambiente fluvial (Figura 2).

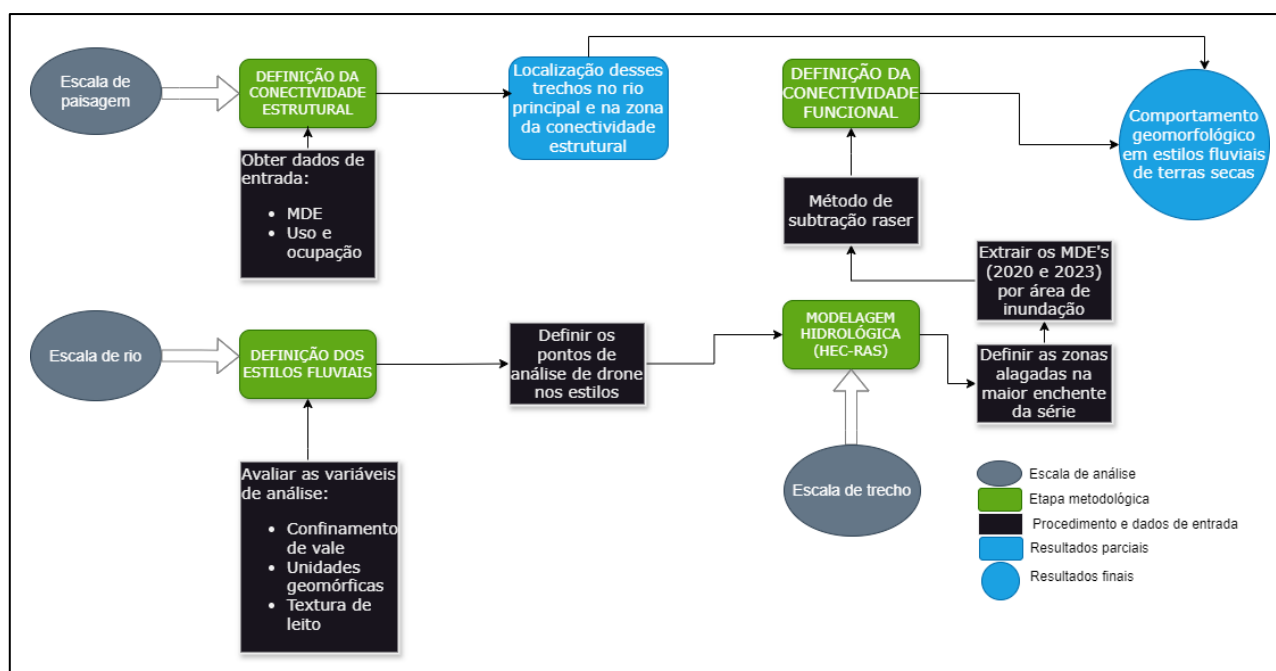


Figura 2 – Etapas metodológicas.

Elaboração: Autores (2025).

4. ANÁLISE DE CONECTIVIDADE ESTRUTURAL

De acordo com a proposta de Borselli, Cassi e Torri (2008) o escoamento difuso e direto, são dependentes do tipo de uso e ocupação da superfície associados à intensidade e duração de eventos de chuva. Entretanto, para identificar a conectividade com base nas características de uma paisagem, é necessário pensar no deslocamento de

água e sedimentos até um sumidouro de maneira contínua e sem interferências da variação hidrológica no tempo, ou seja, um modelo potencial (Figura 3).

Para tal, é necessário analisar o potencial de escoamento através da atribuição de valores para cada pixel de um *shapefile* de uma bacia hidrográfica. É necessário entender que o tempo de chegada de uma partícula de sedimento entre dois pontos em uma bacia hidrográfica (A e B) vai apresentar uma probabilidade inversamente proporcional à distância entre eles.

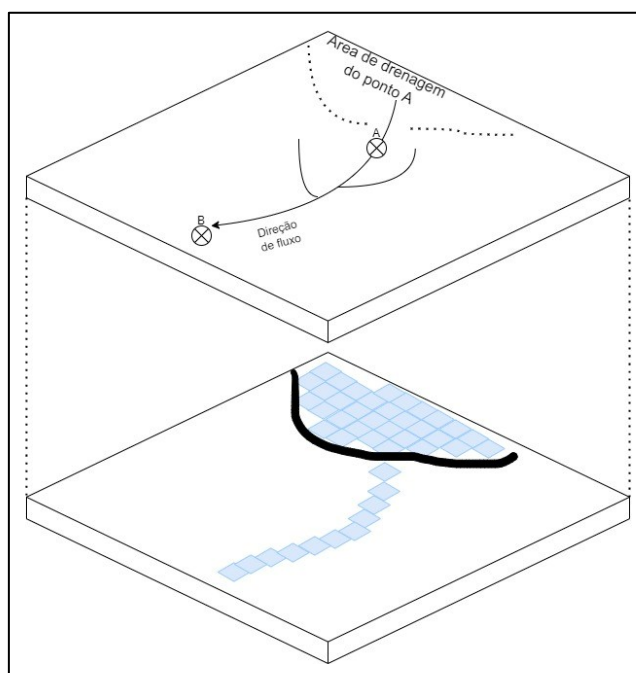


Figura 3 – Representação simplificada do modelo de conectividade com a zona de captação hidrossedimentológica no ponto A e local sumidouro no ponto B. **Elaboração:** Elaborado pelo autor e baseado em Borselli, Cassi e Torri, 2008.

Dessa maneira, são combinados um componente ascendente e um descendente na equação. A componente descendente (D_{dn}) pode ser entendida como a probabilidade de uma massa se deslocar entre dois pontos em uma superfície. As variáveis analisadas são a rugosidade da superfície (W), gradiente (S) e comprimento (d). A rugosidade da superfície é atribuída a partir de uma atribuição de peso de acordo com as características do uso e ocupação da superfície, seguindo a proposição do fator baseado em Panagos, et. al., 2015:

Tabela 1: Classes de fator C de uso de solo.

Classes de uso do solo	Fator W – C	W - Mannings n Valores de rugosidade
Estrada	0,85	0,95
Solo descoberto	0,8	0,95
Agricultura	0,241	0,8
Herbácea	0,25	0,75
Arbustos	0,04	0,65
Árvores	0,006	0,6

Baseado e adaptado em Hooke; Souza; Marchamalo (2021).

A equação que expressa a componente descendente é:

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{w_i s_i} \quad (1)$$

A componente ascendente (D_{up}) é baseada no potencial para direcionamento descendente de descarga e sedimento produzidos nas encostas, através da análise da razão entre rugosidade (W), gradiente (S) e área (A), de acordo com a seguinte equação:

$$D_{up} = \overline{WS} \sqrt{A} \quad (2)$$

Dado o exposto, o Índice de Conectividade estrutural é expresso pela seguinte equação:

$$IC_k = \log_{10} \left(\frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} \right) = \log_{10} \left(\frac{\overline{W}_k \overline{S}_k \sqrt{A_k}}{\sum_{i=k,n} \frac{d_i}{w_i s_i}} \right) \quad (3)$$

5. ANÁLISE DE ESTILOS FLUVIAIS E CONECTIVIDADE FUNCIONAL

A análise dos estilos fluviais na escala de canal será realizada com base na conectividade funcional dos trechos, considerando três variáveis principais: configuração de vale, unidades geomórficas e textura do material de leito (Brierley & Fryirs, 2005). Inicialmente, a identificação da configuração do vale e das unidades geomórficas será conduzida em gabinete por meio da análise de imagens de satélite e modelos digitais de elevação, permitindo a elaboração de um mapa preliminar de estilos fluviais. O trabalho de campo complementar essa etapa, verificando a textura do leito e refinando os limites dos estilos identificados. A coleta de dados será realizada com auxílio de um Veículo Aéreo Não Tripulado (RPA) e imagens do Google Earth, possibilitando uma

caracterização detalhada das unidades geomórficas e da conectividade dos trechos. Além disso, a granulometria do material de leito será analisada em laboratório, classificando os sedimentos em cinco categorias principais. Com esses dados, será gerado um mapa consolidado dos estilos fluviais da bacia do Alto Curso dos rios Paraíba e Piranhas, contribuindo para a compreensão das variações de conectividade e processos atuantes ao longo dos trechos analisados.

A proposta metodológica para análise da conectividade funcional utilizada foi baseada em Calle *et al.*, 2020. Inicialmente, é importante destacar que o modelo unidirecional utilizado não reflete toda a dinâmica do rio, mas apenas a conectividade funcional longitudinal, desconsiderando os processos de encosta.

Considerando que esta pesquisa dispõe de imagens de monitoramento de alta resolução por Veículos Aéreos Não Tripulados (RPA), as principais variáveis analisadas são MDE's e o polígono do ambiente fluvial em diferentes períodos de análise em ambiente GIS (entre 2020 e 2024). Dessa maneira, após a criação do polígono que define o ambiente fluvial pelo qual ocorre a presença de atividade fluvial é feita uma compartimentação de 10 m em 10 m longitudinais que serão utilizados como unidades de cálculo.

Para definir a área ativa do ambiente fluvial, serão processados dados de escoamento e cota de nível de água no HEC-RAS nos pontos selecionados a fim de compreender como e quanto em perspectiva transversal as cheias ocupam o ambiente fluvial, permitindo identificar as zonas de trabalho mecânico (Figura 4).

Cada compartimento será definido como um ponto de erosão ou de transporte a partir da obtenção de duas imagens de drone (ano inicial e final do período de análise) e a definição de seus respectivos MDE's. Posteriormente ambos são submetidos a um cálculo de subtração de *raster*, onde os pixels com valores positivos correspondem as zonas de acumulação de sedimento e os pixels negativos correspondem as zonas de erosão por polígono do trecho. O único sentido do deslocamento de matéria e energia é unidirecional, ou seja, de montante para jusante, o que implica dizer que as zonas de acumulação estão a jusante das zonas erosivas.

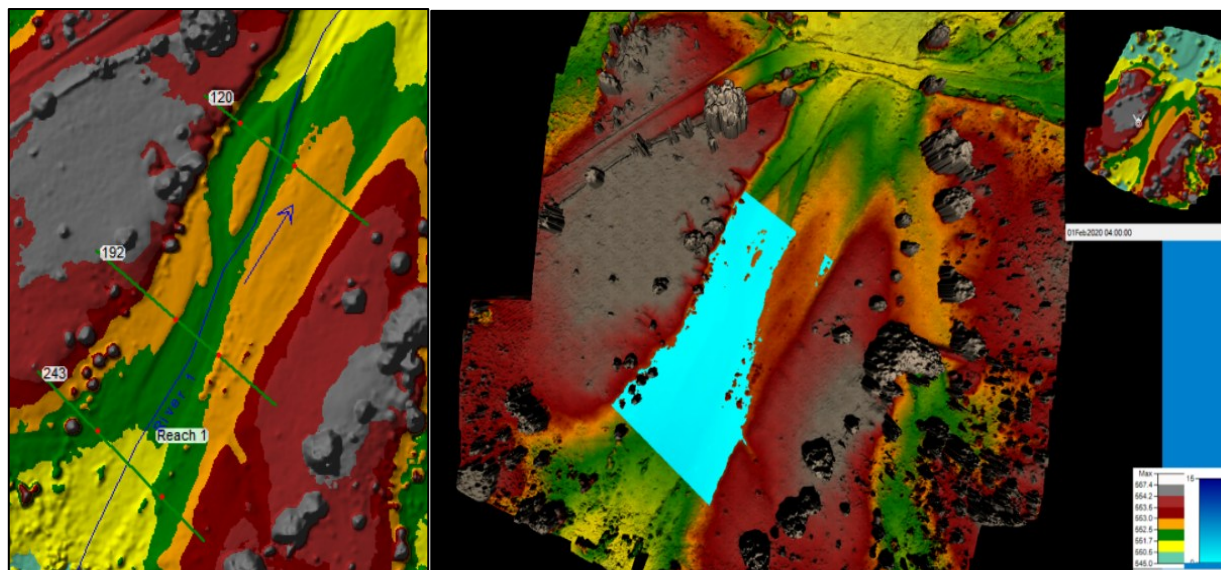


Figura 4 - Exemplo de definição do espaçamento longitudinal e limite do polígono do ambiente transversal através de simulação hidrodinâmica gerada no modelo HEC-RAS. OBS: A explicação de como elaborar resultados similares estão no tópico posterior a este.

Elaboração: Autoral (2023).

6. RESULTADOS

A bacia hidrográfica do alto curso do rio Piranhas possui amplitude altimétrica de 648 metros, tendo altitude mínima de 209m e máxima de 856m. Além disso, os relevos de maiores declividades estão associados a rupturas de declive, as quais ocorrem em planos de falha e diferenças litológicas na bacia, gerando processos de dissecação diferencial e condicionando a existência de zonas íngremes (Rodrigues; Souza, 2020). Todavia, a bacia possui majoritariamente zonas aplainadas. O uso e ocupação do solo também é variável, onde nas áreas de cabeceira ocorre a predominância da agricultura por conta do topo plano e maior disponibilidade hídrica relacionada a maiores volumes de chuva (Rodrigues, 2020). Já a agropecuária acompanha as zonas próximas aos trechos fluviais no terço inferior da bacia, por conta da proximidade com fontes superficiais de água (Figura 5).

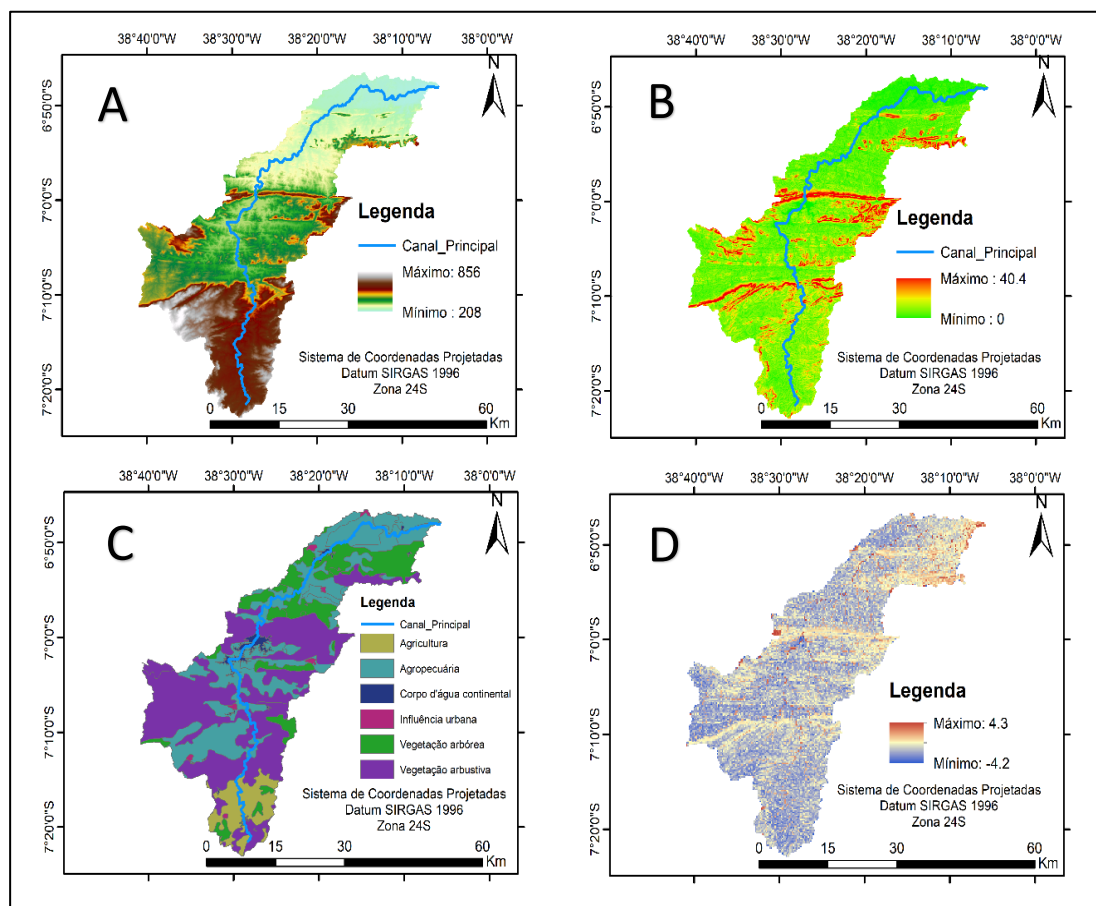


Figura 5 – Controles da paisagem do alto curso do rio Piranhas e Índice de Conectividade Estrutural. A: Mapa de hipsometria; B – Mapa de declividade; C – Mapa de uso e ocupação; D – IC. **Elaboração:** Autores (2025).

Foi possível identificar que as áreas com IC muito baixo estão relacionadas às zonas da bacia com áreas planas, independentemente se forem zonas elevadas ou baixas, o que diminui a conexão de sedimentos para as zonas à jusante. Já as zonas com maiores valores de IC estão associadas às zonas inclinadas, e com maiores áreas de captação de drenagem, o que condiciona maiores velocidades ao escoamento superficial, conforme visto na Figura 6. Por exemplo, na Figura 6 os trechos B e C são confinados e compostos por leito cascalhento/rochoso e rochoso, respectivamente. Assim, a ruptura de declive na área do trecho C condiciona um comportamento de alta energia de fluxo, que associada ao uso de agropecuária e vegetação arbustiva, condiciona a elevada capacidade de produção e transporte de sedimentos, além de conexão entre o terço superior e inferior da bacia. É importante salientar que esses canais rochosos estão em uma zona de transição entre patamares elevados de dissecação e pedimentos dissecados, o que naturalmente os potencializa como trechos de erosão e transposição de sedimentos.

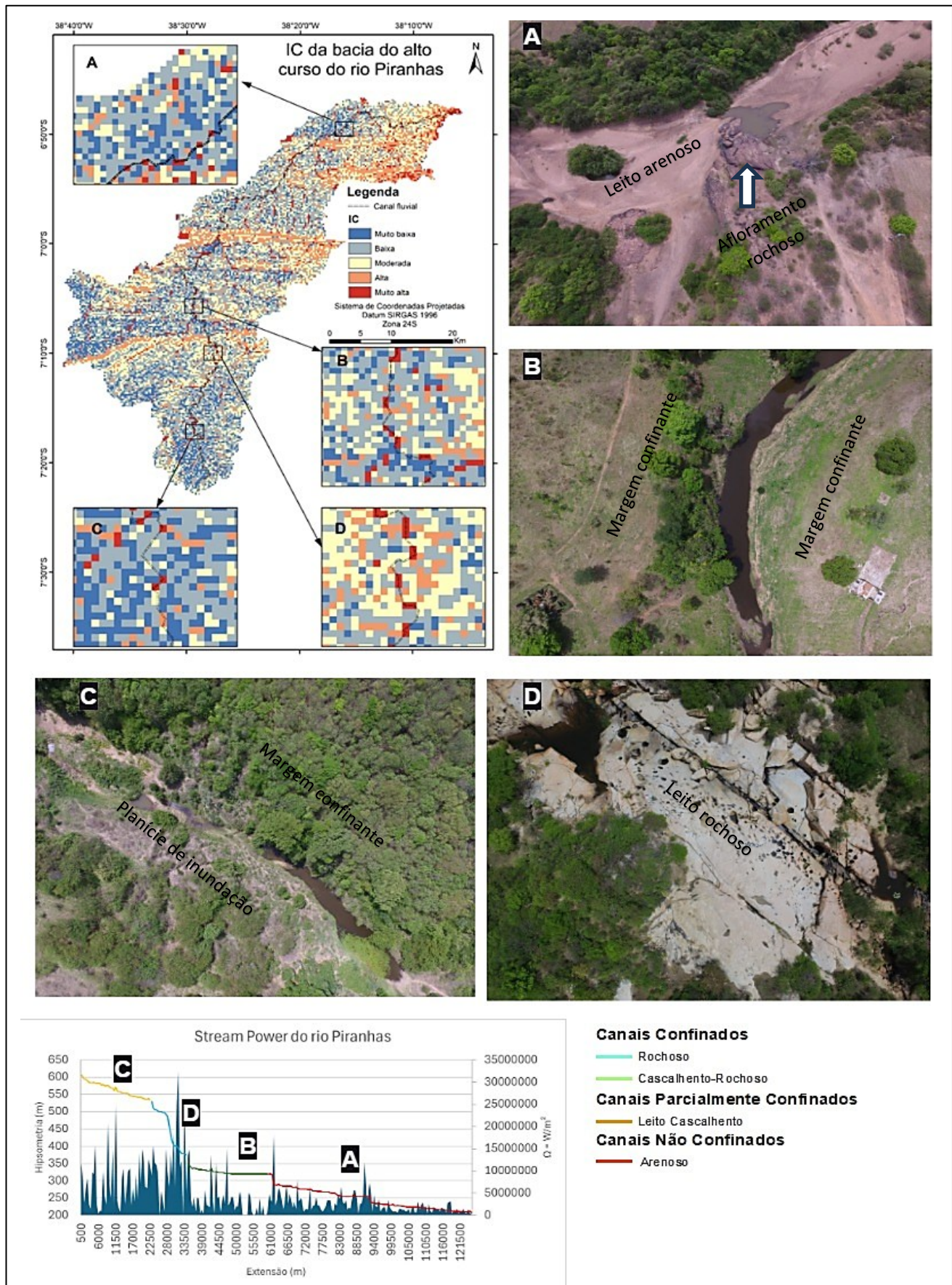


Figura 6 – IC da bacia hidrográfica do alto curso do rio Piranhas e seus respectivos estilos fluviais. A: Estilo Não Confinado Arenoso; B: Estilo Confinado Cascalhento Rochoso; C: Estilo Parcialmente Confinado de Leito Cascalhento; D: Estilo Confinado Rochoso. **Fonte:** autores (2025).

Os trechos A e C estão associados a zonas aplainadas, de baixa energia de fluxo e grande potencial de acumulação de sedimentos. No entanto, o uso da terra através de práticas como agricultura e pecuária extensiva cria pontos específicos de alta produção de sedimentos, os quais se tornam fontes, que ao chegarem na rede de drenagem, são inicialmente acumulados no trecho C de estilo fluvial parcialmente confinado com presença de planícies de inundação contínuas em uma das margens, e, ao chegar nas zonas intermediárias da bacia são rapidamente transportados para as zonas mais rebaixadas, criando morfologias fluviais na rede de drenagem do terço inferior com alta acumulação de sedimentos e amplas planícies de inundação, conforme visto no trecho A com estilo fluvial não confinado.

Após a definição da relação entre estilos fluviais e a conectividade estrutural, foi feita uma simulação hidrológica para definição das áreas alagadas pelos maiores picos de inundação no intuito de definir o ambiente fluvial onde ocorrem os processos mecânicos diretamente relacionados à vazão (Figura 6).

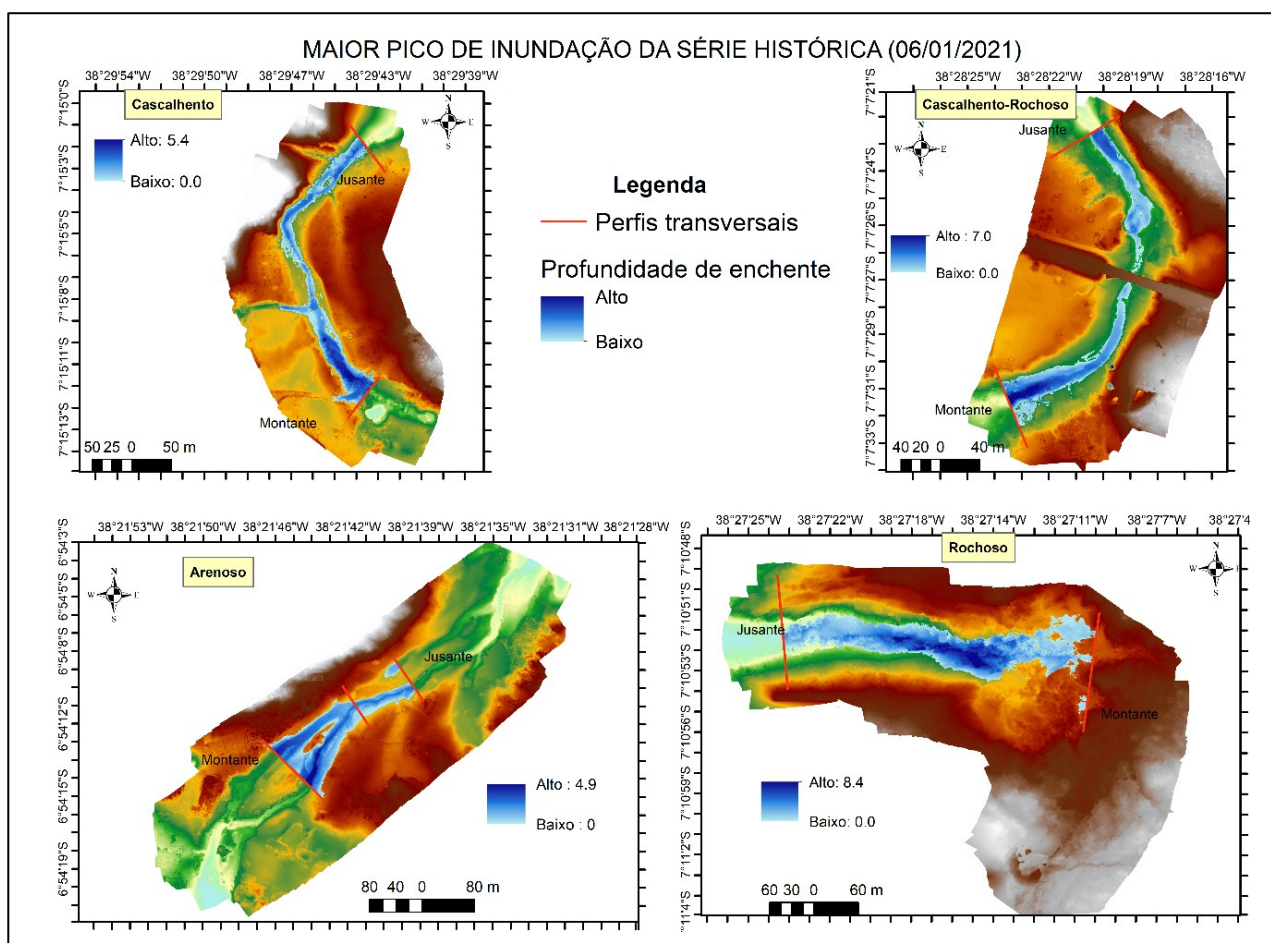


Figura 7 – Maiores picos de inundação da série histórica nos trechos analisados em cada estilos fluviais. **Elaboração:** autores (2025).

A partir da delimitação das áreas alagadas foi possível criar um polígono que permitiu extrair as informações topográficas do ambiente fluvial, e, a partir da subtração *raster*, definir os pontos de erosão e deposição de sedimentos (Figura 7).

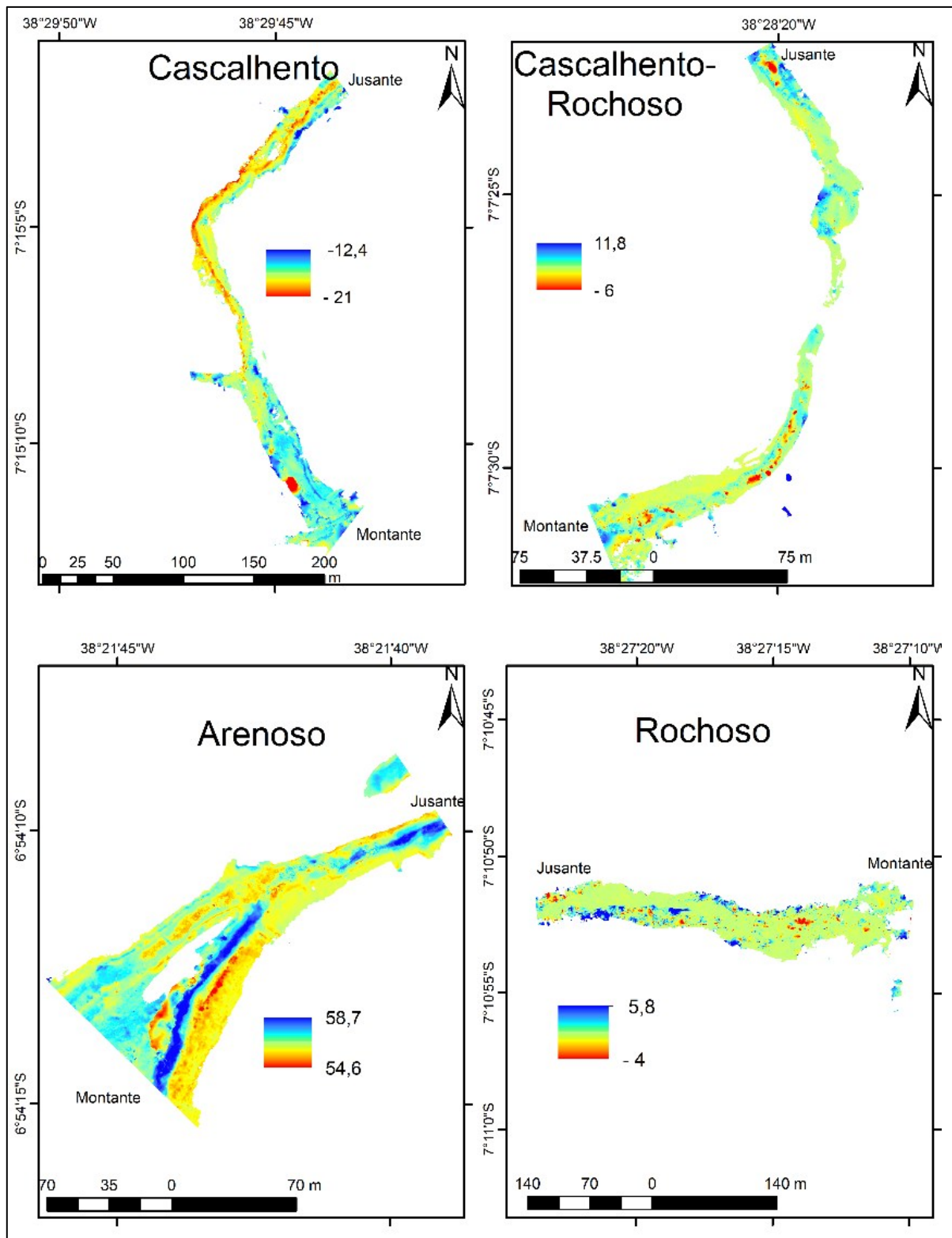


Figura 8 – Processo geomorfológico predominante em cada estilo fluvial.
Elaboração: autores (2025).

O estilo fluvial cascalhento que é parcialmente confinado e localizado na cabeceira é o que apresenta os maiores valores de erosão, variando entre -12,4 e -21, o que indica que está ocorrendo a predominância de remoção de material sedimentar no ambiente fluvial. Já o estilo fluvial rochoso, que vem logo em seguida à jusante, varia de -4 a 5,8, com predominância de pixels zerados, corroborando para uma manutenção das formas fluviais relacionadas às soleiras rochosas e zonas de corredeira. No entanto, é importante destacar que por possuir locais com *potholes* (comumente chamados de marmitas) e afloramentos rochosos, cada evento de vazão é capaz de gerar alterações nas unidades geomórficas a partir da acumulação e deposição de sedimentos em locais pontuais no trecho. O estilo fluvial cascalhento-rochoso possui variações de erosão e deposição em pontos específicos do trecho, principalmente onde ocorre a presença de afloramentos rochosos. Assim, tanto no estilo cascalhento-rochoso como no estilo rochoso há presença de material sedimentar relacionado ao impedimento natural de transporte que são os afloramentos.

O estilo fluvial mais próximo à foz, que é o não confinado arenoso possui valores que estão entre 54,6 e 58,7, ou seja, é um trecho de grande acumulação de material sedimentar, tendo em vista que seu leito e margens arenosos e com planícies de inundação amplas. Isso ocorre por conta da grande área de contribuição e baixa declividade da zona em que o trecho está inserido.

É possível identificar que existe uma correlação entre os índices de conectividade estrutural e funcional, pois as zonas de cabeceira de drenagem contam com predominância de valores de IC estruturais associados à dissecação e valores de IC funcional relacionados à erosão fluvial. Já as zonas mais rebaixadas da bacia também concordam nos processos geomorfológicos.

6. DISCUSSÕES

Diversos trabalhos sobre conectividade da paisagem vêm sendo desenvolvidos no semiárido brasileiro (Franco; Souza, 2019). Todavia, o foco destes trabalhos é sobre o potencial que a relevo possui em deslocar sedimentos sobre diferentes compartimentos da paisagem, ou seja, a conectividade estrutural. Por exemplo, Franco e Souza (2019) perceberam que superfícies desprotegidas e/ou com uso voltado para agropecuárias são propensas a se tornarem zonas fontes de sedimentos por conta do alto potencial erosivo. Quando essas áreas estão próximas a zonas declivosas, esses sedimentos são

deslocados rapidamente, conforme visto no trecho confinado rochoso do alto curso do rio Piranhas.

Entretanto, alguns trabalhos focam na identificação de elementos de desconexão hidrossedimentológica entre os compartimentos da paisagem, como: *Barriers*, *Buffers* e *Blankets* (Castelo Branco *et al.*, 2023; Lima; Marçal; Correa, 2021; Souza; Branco, 2021). Além disso, alguns desses trabalhos tentaram identificar a relação entre a conectividade da paisagem e a tipologia de canais fluviais (Almeida; Correa, 2020; Souza; Correa, 2012). Essas abordagens permitem entender como as formas fluviais estão relacionadas aos controles dos compartimentos da paisagem, ou seja, se é um compartimento erosivo ou deposicional, o que irá implicar no aporte de sedimentos recebidos pelos trechos fluviais, como se viu no estilo não confinado arenoso próximo à foz do alto curso do rio Piranhas, o qual recebe quantidade excessiva de sedimentos que ajudam a tornar o leito completamente arenoso.

Dado o exposto, a discussão acerca da dinâmica funcional da conectividade das paisagens vem sendo negligenciada nos estudos sobre conectividade no semiárido brasileiro. Além disso, a relação entre conectividade estrutural e funcional, sua perspectiva teórico-metodológica e aplicação ainda são um desafio. Contudo, tentativas de classificação de canais fluviais associadas à identificação de desconexão entre os compartimentos da paisagem vêm demonstrando que esse campo de estudo é promissor e permite uma gama de possibilidades de análise (Almeida; Correa, 2020; Lima; Marçal; Correa, 2021; Souza; Correa, 2012).

Ao relacionar as conectividades estrutural e funcional de maneira não excludente, mas complementares, foi possível compreender que a conectividade funcional permite analisar a dinâmica geomorfológica em canais monitorados (Blåfield *et al.*, 2024; Calle *et al.*, 2020), que, ao ser relacionada à metodologia de estilos fluviais, permitem compreender como unidades geomórficas e dinâmica hidrogeomorfológica ocorrem em canais específicos de cada compartimento da paisagem/trecho de rio, simultaneamente (Brierley, 2010; Brierley; Fryirs, 2005; Fryirs; Brierley, 2013; Rodrigues *et al.*, 2023).

A conectividade funcional em bacias hidrográficas semiáridas é fortemente influenciada pelas dinâmicas de águas superficiais e pelo uso da terra. Estudos como o de Bishop-Taylor *et al.* (2017) demonstram que eventos hidrológicos, como secas e inundações, juntamente com práticas de uso da terra, moldam a conectividade entre habitats aquáticos temporários. Adaptar essas abordagens ao contexto brasileiro pode fornecer insights valiosos para a identificação de áreas prioritárias para conservação e

para o desenvolvimento de estratégias de gestão que promovam a resiliência e a biodiversidade em regiões semiáridas (Bishop-Taylor; Tulbure; Broich, 2017).

A conectividade hidrológica também desempenha um papel crucial na dinâmica de ecossistemas em regiões semiáridas. Conforme destacado por Saco et al. (2020), alterações na redistribuição da água e dos sedimentos podem levar a mudanças estruturais e funcionais nas paisagens, resultando em degradação e desertificação. A aplicação de índices de conectividade hidrológica permite detectar limiares críticos e transições em sistemas secos, fornecendo uma ferramenta valiosa para o monitoramento e a gestão sustentável de bacias hidrográficas no semiárido brasileiro (Saco *et al.*, 2020).

É possível também aprofundar as pesquisas sobre essas temáticas, tendo que vista que a compreensão das bacias hidrográficas como sistemas socioecológicos, conforme proposto por Cumming e Allen (2017), permite uma análise mais abrangente da conectividade funcional, integrando aspectos ecológicos e sociais. Essa abordagem destaca a importância da resiliência e da sustentabilidade, considerando as interações entre comunidades locais e o ambiente natural. Além disso, enfatiza a relevância da escala espacial e da conectividade entre diferentes partes da paisagem, bem como a necessidade de uma governança participativa que incorpore múltiplos saberes. Aplicar essa perspectiva ao estudo das bacias hidrográficas do semiárido brasileiro pode fornecer insights valiosos para a gestão e conservação desses sistemas complexos (Cumming; Allen, 2017).

Por fim, modelos topográficos de alta resolução revolucionaram o monitoramento de mudanças fluviais ao comparar lempamentos topográficos fluviais sequenciais (ou seja, detecção de mudanças). No entanto, muito mais pode ser obtido a partir dessa quantificação inovadora de mudanças (Calle *et al.*, 2020), como foi visto nos estilos fluviais identificados na bacia do alto curso do rio Piranhas, onde trechos localizados em compartimentos da paisagem de alto potencial estrutural de conectividade, possuíam também uma taxa erosiva, dando-lhe um caráter incisivo na paisagem.

7. CONCLUSÕES

A análise integrada da conectividade estrutural e funcional na bacia do alto curso do rio Piranhas permitiu compreender como fatores topográficos, uso do solo e eventos hidrológicos moldam os padrões de escoamento e transporte de sedimentos em ambientes intermitentes do semiárido brasileiro. A aplicação conjunta de métricas

geomorfológicas estáticas e modelagens hidrodinâmicas revelou distintos comportamentos hidrossedimentológicos entre os estilos fluviais identificados, ressaltando a importância da abordagem combinada para interpretar a dinâmica dos processos geomorfológicos em bacias áridas e semiáridas.

Os resultados reforçam a relevância de considerar as particularidades dos sistemas fluviais intermitentes no planejamento ambiental e na gestão de recursos hídricos em regiões sensíveis à variabilidade climática. A principal contribuição desta pesquisa está na aplicação metodológica integrada e adaptada a bacias de pequeno porte com dados limitados, ampliando o uso das abordagens de conectividade em contextos em que ainda são pouco exploradas.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a restrição temporal dos dados de conectividade funcional e a escassez de séries históricas de monitoramento de eventos hidrológicos. Investigações futuras podem explorar o papel da vegetação na modulação da conectividade, ampliar a escala de análise para trechos médios e inferiores da bacia e incorporar dados contínuos de sensoriamento remoto para captar variações sazonais mais precisas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. D. M. de; CORREA, A. C. de B. Landscape connectivity and the distribution of alluvial plains in semiarid environment. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 1, p. 171–183, 2020.

BISHOP-TAYLOR, R.; TULBURE, M. G.; BROICH, M. Surface-water dynamics and land use influence landscape connectivity across a major dryland region. **Ecological Applications**, v. 27, n. 4, p. 1124–1137, 2017.

BLÅFIELD, L.; CALLE, M.; KASVI, E.; ALHO, P. Modelling seasonal variation of sediment connectivity and its interplay with river forms. **Geomorphology**, v. 463, 15 out. 2024.

BORSELLI, L.; CASSI, P.; TORRI, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 268–277, 2008.

BRACKEN, L. J.; COX, N. J.; SHANNON, J. The relationship between rainfall inputs and flood generation in south–east Spain. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 5, p. 683–696, 2008.

BRACKEN, L. J.; CROKE, J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 13, p. 1749–1763, 2007.

BRACKEN, L. J.; WAINWRIGHT, J.; ALI, G. A.; TETZLAFF, D.; SMITH, M. W.; REANEY, S. M.; RAY, A. G. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. **Earth-Science Reviews**, v. 119, p. 17–34, 2013.

BRIERLEY, G. J. Landscape memory: the imprint of the past on contemporary landscape forms and processes. **Area**, v. 42, n. 1, p. 76–85, 2010.

BRIERLEY, G. J.; FRYIRS, K. A.; JAIN, V. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. **Geomorphology**, v. 38, p. 165–174, 2006.

BRIERLEY, G.; FRYIRS, K. **Geomorphology and river management: applications of the river styles framework**. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. 416p.

CALLE, M.; CALLE, J.; ALHO, P.; BENITO, G. Inferring sediment transfers and functional connectivity of rivers from repeat topographic surveys. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 45, n. 3, p. 681–693, 2020.

CASTELO BRANCO, A. O. T.; SOUZA, J. O. P.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. A. Longitudinal interference of small structures in the river's hydrological and sedimentological connectivity in a Brazilian semiarid basin. **Catena**, v. 232, 2023.

CORDEIRO, A. M. N.; BASTOS, F. H.; COSTA, D. F. S.; DIAS, J. R. V.; DANTAS, A. N. B. Condicionamento litoestrutural da rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, Nordeste do Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 25, n. 97, 2024.

COSTIGAN, K. H.; JAEGER, K. L.; GOSS, C. W.; FRITZ, K. M.; GOEBEL, P. C. Understanding controls on flow permanence in intermittent rivers to aid ecological research: integrating meteorology, geology and land cover. **Ecohydrology**, v. 9, n. 7, p. 1141–1153, 2016.

CUMMING, G. S.; ALLEN, C. R. Protected areas as social-ecological systems: perspectives from resilience and social-ecological systems theory. **Ecological Applications**, v. 27, n. 5, p. 1700–1712, 2017.

FRANCO, V. V.; SOUZA, J. O. P. de. Conectividade de sedimentos na Bacia Hidrográfica Riacho do Tigre, ambiente semiárido no município de São João do Tigre-PB. **GEOUSP: Espaço e Tempo** (Online), v. 23, n. 3, p. 697–711, 2019.

FRYIRS, K. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 1, p. 30–46, 2013.

FRYIRS, K.; BRIERLEY, G. **Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118305454>. Acesso em: 21 dez. 2024.

HOOKE, J.; SOUZA, J.; MARCHAMALO, M. Evaluation of connectivity indices applied to a Mediterranean agricultural catchment. **Catena**, v. 207, 2021.

JIAO, Y.; ZHAO, D.; XU, Q.; LIU, Z.; DING, Z.; DING, Y.; LIU, C.; ZHA, Z. Mapping lateral and longitudinal hydrological connectivity to identify conservation priority areas in the water-holding forest in Honghe Hani Rice Terraces World Heritage Site. **Landscape Ecology**, v. 35, n. 3, p. 709–725, 2020.

LEXARTZA-ARTZA, I.; WAINWRIGHT, J. Hydrological connectivity: linking concepts with practical implications. **Catena**, v. 79, n. 2, p. 146–152, 2009.

LIMA, G. G.; MARÇAL, M.; CORREA, A. C. Fluvial connectivity in Araripe sedimentary plateau, Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n. 3, p. 625–640, 2021.

LIMA, K. C.; PEREZ FILHO, A.; LUPINACCI, C. M.; VALÉZIO, E. V.; GÓES, L. M. Fluvial responses to external and internal forcing: Upper Holocene dynamics in a low latitude semi-arid region in South America. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 112, p. 103545, 2021.

NADEAU, T.-L.; RAINS, M. C. Hydrological connectivity between headwater streams and downstream waters: how science can inform policy. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 1, p. 118–133, 2007.

OKIN, G. S.; HERAS, M. M.; SACO, P. M.; THROOP, H. L.; VIVONI, E. R.; PARSONS, A.; WAINWRIGHT, J.; PETERS, D. P. C. Connectivity in dryland landscapes: shifting concepts of spatial interactions. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 13, n. 1, p. 20–27, 2015.

POEPPL, R. E.; KEESSTRA, S. D.; MAROULIS, J. A conceptual connectivity framework for understanding geomorphic change in human-impacted fluvial systems. **Geomorphology**, v. 277, p. 237–250, 2017.

RODRIGUES, J. Espacialização das chuvas em uma bacia hidrográfica no semiárido da Paraíba. **Northeast Geosciences Journal**, v. 6, p. 1, 2020.

RODRIGUES, J. M.; SOUZA, J. O. P. de. Parâmetros de controle de estilos fluviais na bacia hidrográfica do alto curso do rio Piranhas, semiárido paraibano. **Caderno de Geografia**, v. 30, n. 62, p. 650, 2020.

RODRIGUES, J. M.; SOUZA, J. O. P. de; XAVIER, R. A. Propensão à modificação de rios a partir da sensibilidade de estilos fluviais em uma bacia hidrográfica no semiárido da Paraíba (Brasil). **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 82, p. 292–313, 2021.

RODRIGUES, J. M.; SOUZA, J. O. P.; XAVIER, R. A.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Geomorphic changes in river styles in a typical catchment of the Brazilian semiarid region. **Catena**, v. 232, p. 107423, 2023.

SACO, P. M.; RODRÍGUEZ, J. F.; HERAS, M. M.; KEESTRA, S.; AZADI, S.; SANDI, S.; BAARTMAN, J.; RODRIGO-CAMINO, J.; ROSSI, M. J. Using hydrological connectivity to detect transitions and degradation thresholds: applications to dryland systems. **Catena**, v. 186, 2020.

SOUZA, J. O. P. de; BRANCO, A. O. T. C. Impedimentos de transmissão no sistema fluvial e a conectividade da paisagem. **Revista da ANPEGE**, v. 16, n. 31, p. 59–73, 2021.

SOUZA, J. O. P. de; CORREA, A. C. B. Conectividade e área de captação efetiva de um sistema fluvial semiárido: bacia do riacho Mulungu, Belém de São Francisco-PE. **Sociedade & Natureza**, v. 24, n. 2, p. 319–332, 2012.

TETZLAFF, D.; SOULSBY, C.; BACON, P. J.; YOUNGSON, A. F. Connectivity between landscapes and riverscapes—a unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science? **Hydrological Processes**, v. 21, n. 10, p. 1385–1389, 2007.

TURNBULL, L.; WAINWRIGHT, J.; BRAZIER, R. E. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation: ecohydrological interactions across multiple-space and time scales. **Ecohydrology**, v. 1, n. 1, p. 23–34, 2008.

WAINWRIGHT, J.; TURNBULL, L.; IBRAHIM, T. G.; LAXARTA-ARTZA, I.; THORNTON, S. F.; BRAZIER, R. E. Linking environmental regimes, space and time: interpretations of structural and functional connectivity. **Geomorphology**, v. 126, n. 3–4, p. 387–404, 2011.

WOHL, E.; BRIERLEY, G.; CADOL, D.; COUTHARD, T. J.; COVINO, T.; FRYIRS, K. A.; GRANT, G.; HILTON, R. G.; LANE, S. N.; MAGILLIGAN, F. J.; MEITZEN, K. M.; PASSALACQUA, P. P.; PEOPL, R. R.; RATHBURN, S. L.; SKAR, L. S. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 44, n. 1, p. 4–26, 2019.

ZHAO, Y.; WANG, S.; LI, J.; DING, A.; WIE, Y. Changes in the hydrological and sediment regimes of two neighboring catchments in the past sixty years. **Catena**, v. 230, 2023.

Recebido: 15/03/2025

Aceito: 10/05/2025