

ABORDAGENS BIOGEOMORFOLÓGICAS E HIDROGEOMORFOLÓGICAS NA EVOLUÇÃO COMPLEXA DE SISTEMAS IRES

Biogeomorphological and Hydrogeomorphological Approaches to the Complex Evolution of Intermittent Rivers and Ephemeral Streams (IRES)

Jonas Otaviano Praça de Souza

Doutor em Geografia, Departamento de Geociências, Universidade

Federal da Paraíba, Brasil

jonas.souza@academico.ufpb.br

Resumo

Os rios não perenes, rios intermitentes e efêmeros (Intermittent rivers and Ephemeral streams - IRES) representam um componente significativo e cada vez mais predominante das redes fluviais globais, constituindo mais da metade da extensão fluvial mundial. Caracterizados pela cessação periódica do fluxo superficial, esses sistemas apresentam imensa variabilidade hidrológica, o que desafia classificações tradicionais e exige uma estrutura conceitual unificada. Ressalta-se o aumento global da não perenidade impulsionado pelas mudanças climáticas e pressões antropogênicas generalizadas, como desmatamento, barramento, superexploração de águas subterrâneas e mudanças no uso da terra. Este artigo sintetiza as complexas dinâmicas hidrogeomorfológicas e biogeomorfológicas dos IRES, com base na literatura recente (e.g., Allen *et al.*, 2020; Datry *et al.*, 2023). Detalha as distintas fases de períodos úmidos e secos, destacando suas implicações eco-hidrológicas e o papel crucial da zona hiporreica na dinâmica biogeomorfológica. Adicionalmente, o texto defende a aplicação de abordagens da ciência da complexidade em estudos biogeomorfológicos e hidrogeomorfológicos na análise dos sistemas IRES. Ao integrar conceitos de não linearidade, retroalimentação, auto-organização e propriedades emergentes de obras fundamentais em hidrogeomorfologia e biogeomorfologia, pode-se alcançar uma compreensão mais holística e preditiva desses ambientes fluviais dinâmicos e diversos, o que é crucial para a gestão eficaz, a conservação e a provisão sustentável de serviços ecossistêmicos diante da aceleração das mudanças ambientais.

Palavras-chave: Rios Não Perenes, Ciência da Complexidade, Rio Intermittente, Rio Efêmero, Gestão de Recursos Hídricos.

Abstract

Non-perennial rivers, encompassing intermittent and ephemeral streams (IRES), constitute a significant and increasingly prevalent component of global fluvial networks, accounting for over half of the world's river length. Characterised by periodic cessation of surface flow, these systems exhibit immense hydrological variability that challenges traditional classifications and necessitates a unified conceptual framework. The global increase in non-perenniality, driven by climate change and widespread anthropogenic pressures such as deforestation, damming, groundwater over-extraction, and land-use change, is highlighted. This article synthesises the complex hydrogeomorphological and biogeomorphological dynamics of IRES, drawing upon recent literature (e.g., Allen *et al.*, 2020; Datry *et al.*, 2023). It details the distinct phases of wet and dry periods, emphasising their eco-hydrological implications and the crucial role of the hyporheic zone in biogeomorphological dynamics. Additionally, the text advocates the

application of complexity science approaches to biogeomorphological and hydrogeomorphological studies of IRES systems. By integrating concepts of non-linearity, feedback, self-organisation, and emergent properties from foundational works in hydrogeomorphology and biogeomorphology, a more holistic and predictive understanding of these dynamic and diverse fluvial environments can be achieved. It is crucial for effective management, conservation, and the sustainable provision of ecosystem services amid accelerating environmental change.

Keywords: Non-Perennial Rivers, Complexity Science, Intermittent River, Ephemeral River, Water Resource Management.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fluviais são componentes vitais dos ecossistemas terrestres, e sua compreensão é fundamental para a gestão ambiental e dos recursos hídricos. Dentro dessa vasta categoria, os Rios Não Perenes (IRES), acrônimo de Intermittent Rivers and Ephemeral Streams, representam uma proporção crescente e globalmente dominante da rede de drenagem, estimando-se que compreendam mais da metade do comprimento total dos rios do mundo (Datry *et al.*, 2023; Messenger *et al.*, 2021). Estes cursos d'água são definidos pela interrupção periódica do fluxo superficial em algum momento do ano, uma característica que os distingue dos rios perenes e confere-lhes uma complexidade hidrológica, biogeomorfológica e eco-hidrológica particular (Allen *et al.*, 2020; Datry *et al.*, 2023).

A terminologia para descrever esses sistemas é vasta, incluindo "rios intermitentes", "rios efêmeros", "drenagens efêmeras" e "rios sazonais". Contudo, o termo unificador "rios não perenes" (non-perennial rivers) tem ganhado destaque devido à dificuldade prática de diferenciar com precisão rios intermitentes (que exibem fluxo sazonal e conexão com o lençol freático, mantendo água subsuperficial) de rios efêmeros (cujo fluxo é predominantemente gerado por eventos de chuva, cessa rapidamente e pode não manter conexão consistente com o lençol freático) (Messenger *et al.*, 2021). Esta distinção é crucial, pois rios intermitentes frequentemente possuem uma zona hiporreica mais desenvolvida e uma conectividade mais persistente com a água subsuperficial, o que lhes confere maior resiliência ecológica e capacidade de sustentar a vida aquática durante os períodos secos. Em contraste, rios efêmeros, dependentes de eventos de precipitação, podem apresentar condições mais extremas de dessecação e menor tempo de residência da água, exigindo adaptações mais drásticas das espécies (Datry *et al.*, 2023). Essa variabilidade hidrológica intrínseca, que pode se manifestar em períodos secos de 2 a 10 meses, ou mesmo por vários anos, resulta em processos dinâmicos e ecologicamente diversos (Datry *et al.*, 2023).

Historicamente, a literatura tem simplificado essa diversidade, agrupando-a em poucas categorias, o que falha em capturar a heterogeneidade e a complexidade desses sistemas e, conseqüentemente, em informar estratégias de manejo adequadas .

Este artigo objetiva debater a dinâmica hidrogeomorfológica e biogeomorfológica dos sistemas IRES, discutindo suas fases de comportamento hidrológico e ecológico, a distribuição global e o aumento da sua ocorrência devido a fatores antrópicos e climáticos. Além disso, propõe-se a integrar a compreensão desses rios sob a lente da ciência da complexidade, enfatizando abordagens biogeomorfológicas e hidrogeomorfológicas. A complexidade inerente a esses sistemas, marcada pela não-linearidade, retroalimentações, auto-organização e propriedades emergentes, exige uma perspectiva que transcenda as análises reducionistas. Uma abordagem reducionista tradicionalmente foca em componentes isolados, como a descarga de água ou o transporte de sedimentos, mas falha em prever o comportamento do sistema como um todo. Em contraste, a ciência da complexidade busca uma compreensão mais holística e integrada das interações entre hidrologia, geomorfologia, ecologia, biogeoquímica e fatores humanos. Tal abordagem é crucial para o desenvolvimento de estratégias de gestão e conservação eficazes e resilientes diante das rápidas transformações ambientais.

2. DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL E DINÂMICAS DOS SISTEMAS IRES

2.1. Fases de comportamento dos rios não perenes e implicações eco-hidrológicas

A dinâmica dos rios não perenes é caracterizada por ciclos de fases úmidas e secas, que influenciam diretamente seus processos biogeomorfológicos e eco-hidrológicos. Allen *et al.* (2020) delinearam um ciclo hidrológico complexo para esses sistemas, que começa com a recarga do sistema fluvial (Figura 01). Nesta fase, a saturação da zona hiporreica (região subsuperficial do leito e das margens, onde a água do rio e do lençol freático se misturam) precede o estabelecimento de um fluxo superficial contínuo. Com o aumento do nível da água, o fluxo pode evoluir de descontínuo (caracterizado por poças isoladas e segmentos secos) para contínuo, podendo culminar em eventos de inundação de unidades geomorfológicas adjacentes, como barras fluviais e planícies de inundação, o que desempenha papel crucial na conectividade lateral e no ciclo de nutrientes. A inundação dessas áreas laterais enriquece o solo com sedimentos e matéria orgânica, criando *hotspots* de biodiversidade e produtividade ecológica.

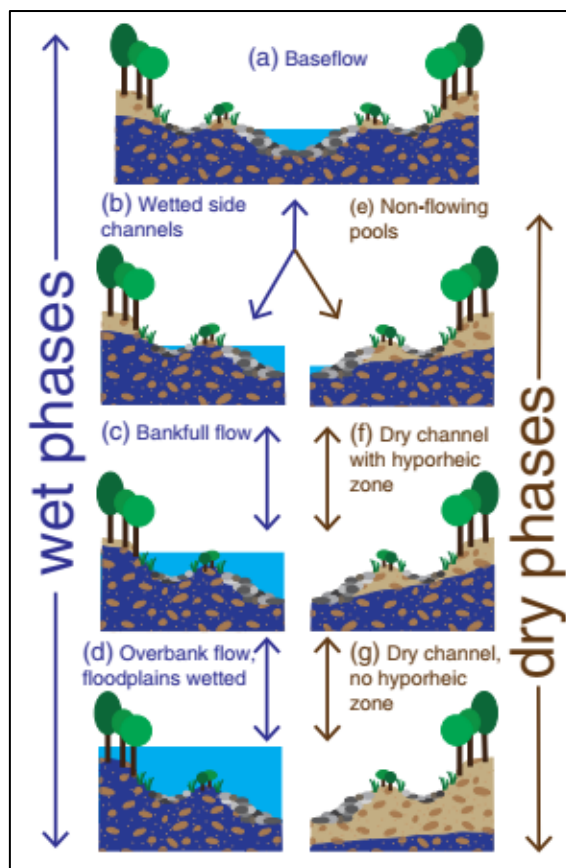


Figura 1 - Ciclo hidrológico de sistemas IRES, ressaltando as fases úmidas e secas
Fonte: Allen *et al.*, 2020.

À medida que o aporte de água diminui, inicia-se o período de déficit hídrico. Ao nível fluvial baixo, as unidades geomorfológicas emersas reaparecem e o fluxo de base diminui, o que interrompe a continuidade do fluxo. Este processo pode gerar trechos com fluxo contínuo e outros descontínuos, fragmentando o habitat aquático e criando poças de água que se tornam refúgios temporários (Leigh *et al.*, 2016). A fase seca progride com o canal secando completamente na superfície, mantendo água apenas na zona hiporreica. Em cenários de seca extrema, pode ocorrer a ausência total de água na zona hiporreica, resultando em um ambiente totalmente seco, com estresse máximo aos ecossistemas e sobrevivência das espécies dependente de estratégias de dormência prolongada ou de migração para outros ambientes.

Datry *et al.* (2023) aprofundam essa discussão (Figura 2), com foco nas implicações ecológicas, propondo quatro fases de sazonalidade hidrológica, cada uma com características e desafios ecológicos distintos:

- Fase 1 (Fluxo Contínuo): Ambiente aquático estável, propício a organismos adaptados a condições perenes. A conectividade longitudinal é máxima, facilitando a dispersão e o fluxo gênico entre espécies aquáticas. A estabilidade do fluxo permite o desenvolvimento de cadeias alimentares complexas e a manutenção de alta diversidade biológica.
- Fase 2 (Diminuição do Fluxo e Fragmentação): Redução do nível de água, tornando o fluxo descontínuo e ecologicamente desafiador. A formação de poças isoladas concentra recursos e predadores, exigindo adaptação fisiológica (e.g., tolerância a altas temperaturas e a baixos níveis de oxigênio) ou a migração das comunidades aquáticas. A qualidade da água pode deteriorar-se devido ao aumento da temperatura, diminuição do oxigênio dissolvido e acúmulo de matéria orgânica, levando a *stressors* para a biota.
- Fase 3 (Fase Seca): Ausência de fluxo superficial, com possível presença de água na zona hiporreica, servindo como refúgio para espécies que podem estar, enterrar-se ou sobreviver em formas de resistência (e.g., ovos, cistos). A paisagem fluvial transforma-se em um corredor terrestre, influenciando espécies terrestres (que podem usar o leito seco como rota de migração ou como área de forrageamento) e a dinâmica de sedimentos e nutrientes (e.g., oxidação de matéria orgânica, transporte eólico de sedimentos finos).
- Fase 4 (Reumedecimento e Recolonização): Retorno do aporte de água, crucial para a recolonização e recuperação dos ecossistemas aquáticos e ripários. A velocidade e a magnitude do reumedecimento influenciam a resiliência do sistema e a capacidade de restabelecimento da biodiversidade. Eventos de *flash flood* podem ser disruptivos, enquanto um reumedecimento gradual permite uma recuperação mais ordenada. A "memória ecológica" do sistema, como a presença de estoques de sementes e ovos dormentes, é fundamental nesta fase.

A dificuldade em monitorar e classificar com precisão rios intermitentes e efêmeros, devido à escassez de dados de longo prazo, aos altos custos de instrumentalização e à natureza dinâmica e imprevisível de seus fluxos, reforça a necessidade de adotar o termo abrangente "rios não perenes" ou IRES para descrever esses sistemas complexos e de focar em suas características funcionais e ecológicas.

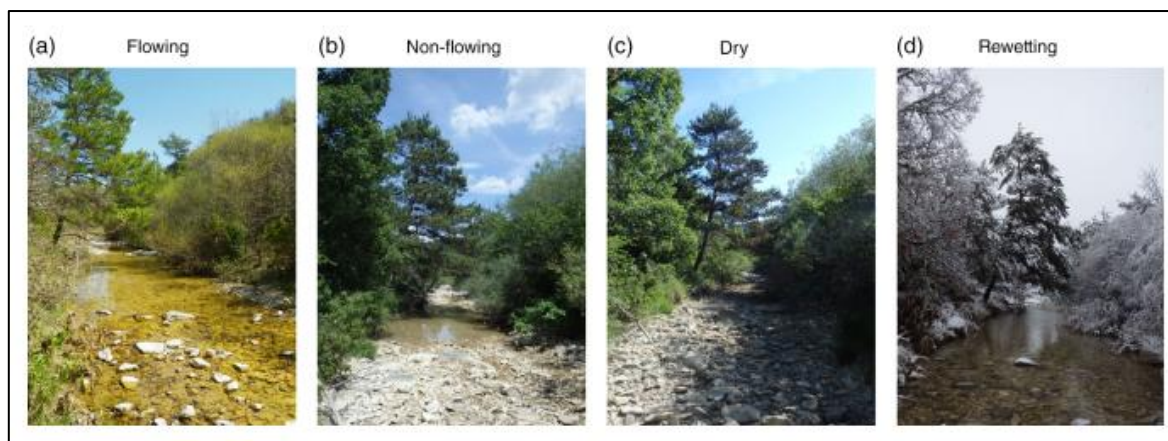


Figura 2 - Fases de sazonalidade hidrológica em sistemas IRES.

Fonte: Allen *et al.*, 2020; Datry *et al.*, 2023.

2.2. Distribuição global e aumento dos rios não perenes: implicações e causas

A ocorrência de rios não perenes não se restringe a regiões áridas e semiáridas, mas apresenta distribuição verdadeiramente global (Figura 3 – superior), abrangendo todos os continentes e biomas (Datry *et al.*, 2023). Mesmo em áreas úmidas e temperadas, é comum encontrar segmentos intermitentes e efêmeros, particularmente em afluentes menores, cabeceiras de bacias (Figura 3 – inferior) e áreas com geologias específicas. Esta distribuição ampla é um reflexo da interação complexa entre o clima (padrões de precipitação e evapotranspiração), a geologia (permeabilidade do substrato, presença de aquíferos, tipo de rocha), a geomorfologia (declividade, características do canal, presença de terraços fluviais) e os padrões sazonais de precipitação e temperatura. Por exemplo, em regiões montanhosas, a intermitência pode ser controlada sazonalmente pelo derretimento da neve (snowmelt), enquanto, em regiões tropicais, é dominada pelas estações chuvosas e secas.

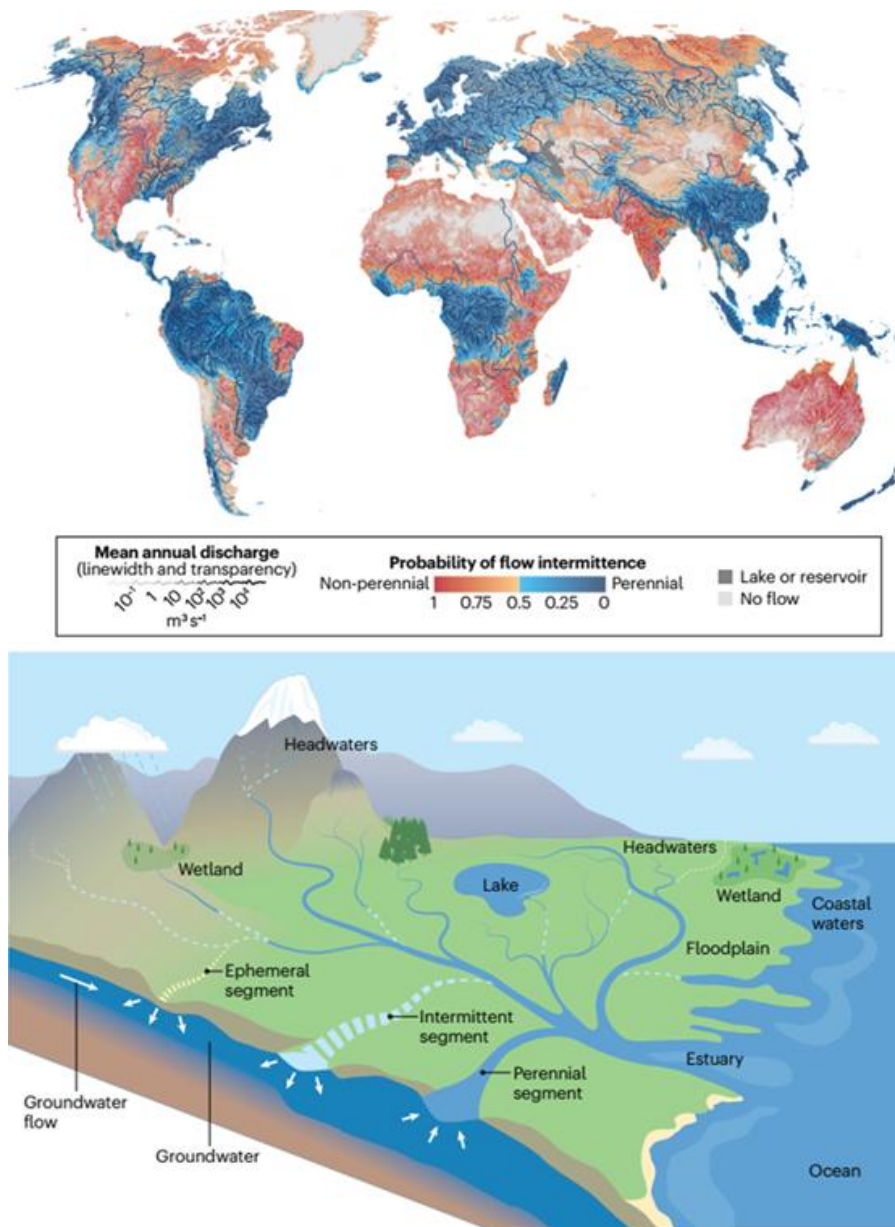


Figura 3 - Superior - Distribuição global da probabilidade de intermitência do fluxo (Datry *et al.*, 2023). Inferior – Modelo de sistema fluvial indicando a presença de rios não perenes (Datry *et al.*, 2023).

Mais alarmante é o aumento global comprovado da intermitência e da efemeridade dos rios, conforme discutido por Datry *et al.* (2023) e por outros estudos recentes (Messenger *et al.*, 2021). Este fenômeno é atribuído não apenas às mudanças climáticas, que alteram padrões de precipitação (intensificando secas e eventos extremos), aumentam a evapotranspiração e reduzem as massas de gelo em regiões montanhosas, mas também, fundamentalmente, às ações antrópicas diretas e indiretas. Entre estas, destacam-se:

- Modificação da Cobertura Vegetal: Desmatamento, urbanização e conversão de terras para agricultura alteram o balanço hídrico, diminuindo a infiltração de água no solo, aumentando o escoamento superficial rápido e reduzindo a recarga do lençol freático e o fluxo de base. A remoção da vegetação nativa, especialmente em áreas de cabeceira, pode levar a um aumento da erosão do solo, ao assoreamento dos canais e a uma diminuição da capacidade de retenção de água na bacia.
- Projetos de Barramento: Barragens, açudes e represas modificam drasticamente a hidrologia natural a montante e a jusante, alterando os regimes de fluxo (e.g., reduzindo a frequência e a magnitude de cheias, aumentando a duração de vazões mínimas), retendo sedimentos e nutrientes e, frequentemente, reduzindo o fluxo a jusante a ponto de induzir a não-perenidade.
- Remoção de Vegetação Ripária: A vegetação nas margens dos rios desempenha um papel crucial na estabilização do solo, na moderação da temperatura da água (por fornecer sombra), na manutenção da umidade do solo (reduzindo a evaporação direta) e na filtragem de poluentes, contribuindo para o fluxo de base. Sua remoção exacerba a evaporação, a erosão das margens (levando ao alargamento do canal e à perda de profundidade).
- Exploração Excessiva de Água Subterrânea: O bombeamento excessivo de aquíferos para irrigação e abastecimento urbano e industrial rebaixa o nível freático raso, essencial ao fluxo perene de muitos rios. Este é um dos fatores mais críticos na conversão de trechos historicamente perenes em intermitentes e efêmeros. A falta de monitoramento adequado e de regulamentação da extração de água subterrânea agrava este problema.

Essas pressões antrópicas interagem de forma complexa com as mudanças climáticas, criando *processos de retroalimentação* que aceleram a não-perenidade. Por exemplo, o aumento das temperaturas globais intensifica a demanda por irrigação, levando a maior extração de água subterrânea, o que, por sua vez, rebaixa o lençol freático e contribui para a intermitência fluvial. A degradação da vegetação ripária, por sua vez, pode aumentar a temperatura da água, tornando os rios mais vulneráveis à evaporação e à perda de fluxo, especialmente em climas mais quentes.

2.3. Esforços de pesquisa e a diversidade hidrogeomorfológica e biogeomorfológica

A compreensão da diversidade hidrológica e das dinâmicas hidrogeomorfológicas (Rodrigues e Souza, 2025) e biogeomorfológicas (Figura 4) dos rios (Valdati e Souza, 2025), incluindo os não perenes, tem sido um foco crescente de pesquisa.

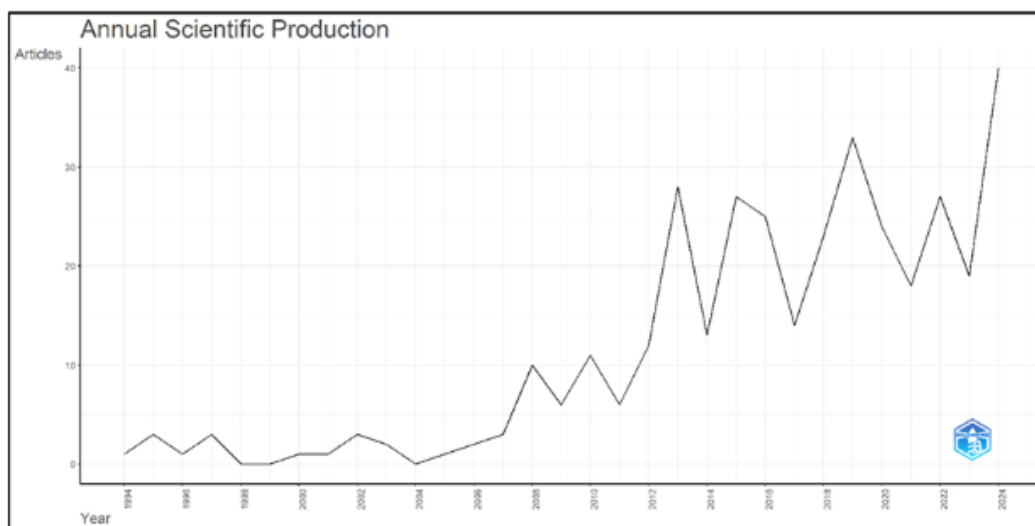


Figura 4 - Produção anual em biogeomorfologia fluvial.

Fonte: Valdati e Souza, 2025.

Estudos buscam entender como intervenções como barragens afetam o padrão hidrológico, incluindo a frequência de fluxo e seca, e os níveis extremos de cheia e seca, e como essas alterações se traduzem em respostas geomorfológicas, como a incisão do canal, a alteração da granulometria do leito (e.g., encouraçamento do leito, deposição de finos), a formação de barras e a perda de conectividade lateral. Nessa perspectiva, Rodrigues e Souza (2025) visando identificar a diversidade fluvial e de comportamento hidrogeomorfológica entre dois importantes rios intermitentes da Paraíba (Rio Paraíba e Alto Curso do Rio Piranhas) analisaram informações hidrológicas (magnitude, temporalidade, frequência, duração e taxa de mudança dos padrões de comportamento) (Figura 5) e suas relações com características geomorfológicas (e.g., largura/profundidade do canal, sinuosidade, tipo de leito, presença de pools e riffles) e com o uso do solo (Figura 6). A partir da análise, os autores ressaltaram a importância da geologia (e.g., rochas permeáveis vs. impermeáveis, a presença e características de aquíferos, falhas geológicas que podem controlar o fluxo subsuperficial) na capacidade de armazenamento de água e na resposta hidrológica, bem como a influência da vegetação ripária na estabilidade do canal, na dinâmica de sedimentos e na rugosidade hidráulica.

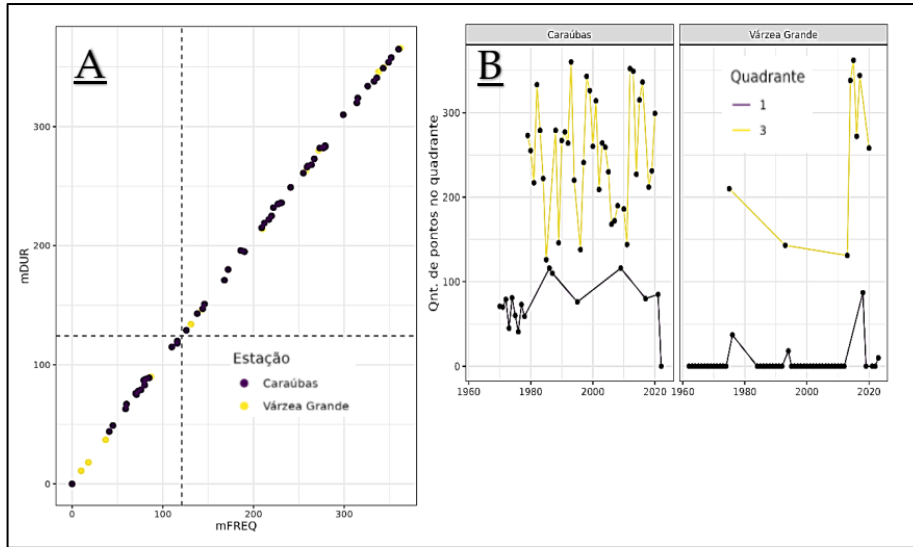


Figura 5 - Duração e frequência dos eventos de vazão nas estações fluviométricas de Caráúbas (Rio Paraíba) e Várzea Grande (Rio Piranhas).

Fonte: Rodrigues e Souza, 2025.

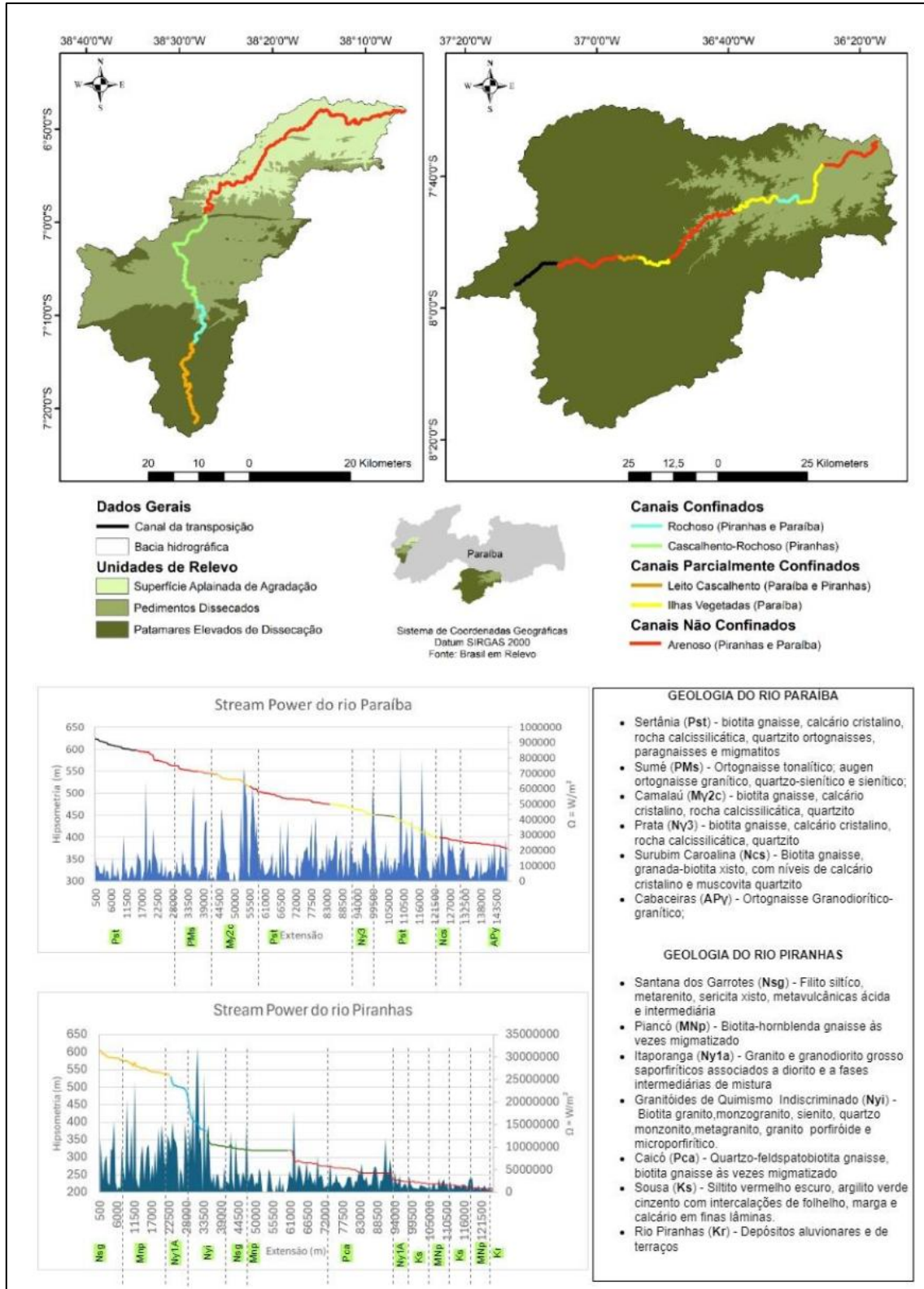


Figura 6 - Diversidade fluvial e interações geomorfológicas, geológicas e hidrológicas.
 Fonte: Rodrigues e Souza, 2025.

A coleta de dados em rios não perenes apresenta desafios específicos. Métodos tradicionais de monitoramento hidrométrico (e.g., estações fluviométricas com medição contínua) são caros e, muitas vezes, inadequados para capturar a variabilidade temporal e espacial desses sistemas, especialmente a transição rápida entre a estação de chuvas e a seca. Novas abordagens, como o uso de sensores de temperatura para inferir a presença de fluxo subsuperficial (baseado na diferença térmica entre a água do rio e a água subsuperficial) (Briggs *et al.*, 2016), sensoriamento remoto (e.g., imagens de satélite de alta resolução como Sentinel-2 ou Landsat para mapear a extensão de áreas úmidas e secas (Onojeghuo *et al.*, 2021), ou LiDAR para caracterização topográfica detalhada (Onojeghuo *et al.*, 2021), e o *crowdsourcing* de dados (observações de cidadãos sobre a presença ou ausência de fluxo) (Truchy *et al.*, 2023), estão se tornando ferramentas essenciais para preencher lacunas de dados e melhorar a compreensão desses ambientes. A integração desses dados com modelos hidrológicos e geomorfológicos em plataformas SIG permite análises espaciais e temporais mais robustas.

3. ABORDAGENS DA COMPLEXIDADE NA GEOMORFOLOGIA DE RIOS NÃO PERENES

Para uma compreensão adequada do comportamento multifacetado dos rios não perenes, torna-se imperativa a adoção de abordagens da ciência da complexidade. Sistemas naturais, incluindo os fluviais, são caracterizados por não-linearidade, retroalimentação, auto-organização, múltiplos estados de equilíbrio (ou "regimes") e propriedades emergentes, nas quais o comportamento do todo não pode ser inferido linearmente de suas partes (Phillips, 1992). A dinâmica desses ambientes intermitentes e efêmeros é intrinsecamente complexa, envolvendo interações multifacetadas entre hidrologia (superficial e subsuperficial), sedimentos (transporte, deposição, erosão), vegetação (ripária e aquática), clima e atividades humanas, operando em múltiplas escalas espaciais (desde o micro-habitat até a bacia hidrográfica) e temporais (desde eventos de cheia instantâneos até mudanças climáticas de longo prazo).

A integração da ciência da complexidade nos estudos geomorfológicos e hidrogeomorfológicos não é recente, mas sua aplicação aos IRES é particularmente relevante devido à natureza altamente dinâmica e imprevisível desses sistemas. Brunsdon e Thornes, em 1979, em um artigo clássico, "*Landscape Sensitivity and change*", introduzem o conceito de sensibilidade da paisagem, que descreve a propensão de uma paisagem a mudar em resposta a perturbações, um conceito fundamental para

compreender a resiliência e a vulnerabilidade dos IRES. Um rio não perene pode ser altamente sensível a pequenas mudanças no regime hídrico, transicionando abruptamente entre um estado de fluxo e outro seco. Outras contribuições fundamentais incluem:

- Thornes e Brunsden (década de 1970): No livro "Geomorphology and Time" (1977), discutem a temporalidade da geomorfologia e a complexidade dos processos geomorfológicos, enfatizando a importância das escalas temporais para a compreensão da evolução da paisagem fluvial. Pensando nos contextos de sistemas IRES, isso significa reconhecer que a evolução do canal não é um processo contínuo e linear, mas sim pontuado por eventos de fluxo e seca que remodelam o leito em ritmos distintos.

- Chorley, Kennedy e Gregory (décadas de 1960/70/80): Chorley e Kennedy em 'Physical Geography: A Systems Approach' (1971), e Gregory (1985), em 'The Nature of Physical Geography', propuseram uma visão sistêmica da geografia física, avançando na discussão de sistemas ambientais complexos e de suas interconexões. Esta abordagem é crucial para os sistemas IRES, nos quais o rio é considerado um sistema aberto, interagindo com a bacia, a atmosfera e os ecossistemas adjacentes.

- Rhoads e Thorn: Em "The Scientific Nature of Geomorphology" (1996), exploram a base epistemológica da geomorfologia, discutindo a aplicação da teoria dos sistemas para compreender a auto-organização e a emergência de padrões em rios. Em sistemas IRES, a auto-organização pode ser observada na formação de *pools* e *riffles*, ou na distribuição da vegetação ripária, em resposta aos padrões de fluxo e seca.

- Antônio Cristofolletti (Brasil, década de 1970 em diante): Pioneiro na discussão de análises sistêmicas e complexas no Brasil, publicou "Modelagem de Sistemas Ambientais" (1999), aplicando a Teoria Geral dos Sistemas de von Bertalanffy e conceitos da complexidade à análise de sistemas ambientais complexos, fornecendo uma estrutura para modelar as interações em bacias hidrográficas não perenes. Sua obra é fundamental para contextualizar a complexidade dos sistemas fluviais brasileiros, muitos dos quais são não perenes.

- Schumm (1977): Seu livro "The Fluvial System" foi um marco na análise fluvial, ao consolidar conceitos como uniformidade de processos, limiares de mudança, evolução da paisagem e respostas complexas. Além de ressaltar a importância das interações entre a descarga de água, a carga de sedimentos e as características do canal, que são altamente variáveis em IRES. Schumm demonstrou como pequenas variações nesses *inputs* podem levar a grandes mudanças na morfologia do canal, um princípio central para a compreensão da dinâmica dos rios não perenes.

- Graff (1988): Graff, com o livro “Fluvial Processes in Dryland Rivers”, constrói e compila um arcabouço teórico específico sobre o tema, sendo o texto basilar para o desenvolvimento dos estudos sobre rios em terras secas. No início do livro, afirma: “Um dos mais surpreendentes paradoxos das terras secas do mundo é que, embora elas sejam terras com pouca chuva, os detalhes das suas superfícies são, sobretudo, produto das ações dos rios” (Graf, 1988, p. 3, tradução do autor). Ou seja, para entender as terras secas é necessário compreender os processos fluviais

- Phillips (2021): Em "Landscape Evolution: Landforms, Ecosystems, and Soils", discute de forma integrada a dinâmica da ciência da natureza, as interações entre os elementos dos diversos sistemas ambientais e a coevolução de formas de relevo, ecossistemas e solos, oferecendo uma perspectiva holística sobre os sistemas fluviais. Phillips também publicou diversos trabalhos sobre não-linearidade e complexidade em geomorfologia (e.g., 1992, 2004, 2006, 2009, 2013, 2020), reforçando a necessidade de abordagens não-lineares para capturar a essência dos processos geomorfológicos.

Artigos-chave:

- "Reaction, Relaxation, and Lag in Natural Sedimentary Systems: General Principles, Examples, and Lessons" de J. R. L. Allen (1974), que explora como os sistemas geomorfológicos respondem a perturbações ao longo do tempo, é um conceito vital para rios com regimes de fluxo altamente variáveis. A "reação" instantânea a uma cheia, a "relaxação" gradual após o evento e o "lag" (atraso) na resposta do sistema são cruciais para entender como os IRES se recuperam ou se transformam.

- "Uncertainty About Probability: A Decision Analysis Perspective" de Ronald Howard (1988), embora não focado exclusivamente em geomorfologia, fornece frameworks para lidar com a incerteza inerente aos sistemas complexos, o que é relevante para a gestão de recursos hídricos em IRES, onde a previsão do regime de fluxo é altamente incerta.

- "Nonlinear Dynamic Systems in Geomorphology: Revolution or Evolution?" de Jonathan D. Phillips (1992), que argumenta pela necessidade de adotar abordagens não-lineares para compreender a complexidade dos processos geomorfológicos, como as transições abruptas entre fluxo e seca e a ocorrência de limiares (*thresholds*) que levam a mudanças de estado.

- O conceito de sensibilidade da paisagem, consolidado a partir uma edição especial da revista *Catena* em 2001, retomado posteriormente por Fryirs (2017) em com o foco na sensibilidade fluvial, discutindo várias abordagens da sensibilidade em diferentes áreas da geomorfologia, demonstrando como usar e evoluir esses conceitos para uma análise mais

adequada da geomorfologia fluvial, especialmente em um contexto de mudanças ambientais aceleradas. A sensibilidade pode ser expressa como a magnitude da mudança geomorfológica em resposta a uma determinada perturbação e é particularmente elevada em IRES (Souza e Corrêa, 2015).

Esses trabalhos demonstram uma trajetória de pesquisa que reconhece a natureza complexa e dinâmica dos sistemas fluviais, fornecendo a base epistemológica e metodológica para abordar os desafios impostos pelos rios não perenes. A aplicação desses *frameworks* é essencial para desvendar os comportamentos e as respostas desses rios a perturbações ambientais e antrópicas, permitindo uma previsão mais acurada e uma gestão mais adaptativa.

4. INTERAÇÕES BIOGEOMORFOLÓGICAS EM RIOS NÃO PERENES

A transição global de rios perenes para não perenes, e o aumento da intermitência e efemeridade em escala planetária, sinalizam uma crise hidrológica e ecológica de proporções significativas. Esta realidade impõe uma urgente mudança de paradigma na pesquisa e na gestão fluvial. A simplificação histórica na classificação desses rios frequentemente negligenciou a vasta diversidade hidrológica e seus impactos distintos nos processos biogeomorfológicos e nos ecossistemas. A dificuldade prática de distinguir com precisão entre rios intermitentes e efêmeros sublinha a necessidade não apenas de uma terminologia unificada, mas, mais crucialmente, de abordagens analíticas que reconheçam sua variabilidade fundamental como uma característica intrínseca e definidora, e não como uma mera anomalia ou desvio do estado perene.

4.1. Interações entre Biota, Ecologia, Biogeografia e Geomorfologia

Em rios não perenes, as interações entre a biota, os processos ecológicos, a biogeografia e a geomorfologia são intrinsecamente interligadas, exibindo dinamicidade e resiliência excepcionais. A geomorfologia do canal transcende a função de mero substrato físico; ela modula diretamente a disponibilidade de água e, conseqüentemente, a formação e a persistência de habitats aquáticos e terrestres. Por exemplo, a heterogeneidade geomorfológica, manifestada pela presença de leitos rochosos, depósitos aluviais mais profundos, bancos de cascalho ou de areia, cria uma miríade de micro-habitats essenciais à sobrevivência da biota durante as fases secas (Leigh *et al.*, 2016).

Depressões no leito do rio, conhecidas como *pools* ou poças isoladas, tornam-se refúgios vitais. Nestes locais, a água remanescente concentra a vida aquática, como invertebrados (e.g., larvas de insetos, crustáceos adaptados à dessecação), peixes e anfíbios, permitindo sua persistência em um mosaico de ambientes úmidos e secos (Leigh *et al.*, 2016). A topografia do leito, incluindo a sequência de *riffles* (trechos rasos e turbulentos) e *pools* (trechos mais profundos e calmos), influencia diretamente a retenção de água e a formação desses refúgios, determinando a capacidade de suporte do ecossistema durante períodos de seca prolongada. A granulometria do substrato também é crucial; por exemplo, leitos com maior proporção de cascalho e areia podem reter mais água intersticial, atuando como microrefúgios subterrâneos para alguns organismos.

A biota, por sua vez, exerce influência geomorfológica significativa, estabelecendo *retroalimentações* biogeomorfológicas complexas. A vegetação ripária é um exemplo primordial: suas raízes penetram e estabilizam as margens do canal, reduzindo a erosão lateral e vertical, o que influencia diretamente a largura, a profundidade e a sinuosidade do canal (Gurnell e Bertoldi, 2024). Além disso, a vegetação pode aumentar a rugosidade do leito e das margens, alterando a velocidade do fluxo e a deposição de sedimentos. Árvores e grandes detritos de madeira (*Large Wood Debris* - LWD) que caem nos canais atuam como obstáculos naturais, alterando os padrões de fluxo, criando represamentos temporários, retendo sedimentos a montante e causando processos de *scour* (erosão localizada) a jusante, o que forma novas poças e micro-habitats para a fauna aquática (Cashman *et al.*, 2021). Durante as fases secas, a vegetação que coloniza o leito exposto do rio pode capturar sedimentos e matéria orgânica transportados pela água, influenciando o desenvolvimento da morfologia fluvial e das unidades geomorfológicas (Sandercock e Hooke, 2011). Essas interações moldam a paisagem fluvial, criando uma coevolução entre a forma do canal e a comunidade biológica. A distribuição biogeográfica de espécies vegetais adaptadas a ambientes ripários de sistemas IRES, por exemplo, pode servir como indicador da frequência e da duração das fases secas, e vice-versa (Datry *et al.*, 2023).

4.2. Dinâmica Biogeomorfológica de Rios Não Perenes

A dinâmica biogeomorfológica de rios não perenes é caracterizada por resiliência e adaptação notáveis, mas também por alta sensibilidade a perturbações, especialmente as que alteram o regime hidrológico. As características do canal são continuamente moldadas por regimes de fluxo intermitentes e efêmeros, o que resulta em uma geomorfologia que

reflete essa variabilidade. Eventos de cheia intensa, mesmo que de curta duração, podem causar erosão e transporte significativo de sedimentos, reconfigurando o leito do rio por meio de processos de erosão, deposição de barras e alteração da sinuosidade. Em contraste, períodos prolongados de seca permitem a colonização do leito exposto por vegetação pioneira (e.g., gramíneas, ervas daninhas), que pode estabilizar o sedimento, aumentar a rugosidade do leito e, conseqüentemente, influenciar a hidrodinâmica do próximo evento de fluxo (Stromberg e Boudell, 2013). A interação entre sedimento e biota é particularmente acentuada nesses ambientes. O substrato do leito de um rio não perene pode variar de cascalho e areia a finos (silte e argila), além de matéria orgânica. A decomposição de matéria orgânica no sedimento exposto pode alterar sua coesão e, conseqüentemente, sua erodibilidade quando o fluxo retorna, afetando a mobilidade do sedimento e a morfologia do canal (Shakeel *et al.*, 2022).

As mudanças antrópicas no regime de fluxo, como a regularização por barragens, a extração excessiva de água superficial e subterrânea, ou a diminuição da recarga de aquíferos devido à impermeabilização do solo, podem desequilibrar essas delicadas interações biogeomorfológicas. Por exemplo, a redução da frequência e da intensidade de cheias pode levar à invasão do canal por vegetação lenhosa, alterando drasticamente a morfologia, a dinâmica dos sedimentos e a capacidade de transporte do rio (Vesipa, *et al.*, 2017). A intensificação das secas, por outro lado, pode levar à perda de espécies menos tolerantes ao estresse hídrico e à predominância de espécies mais adaptadas à seca, simplificando a estrutura trófica e reduzindo a biodiversidade geral do sistema (Datry *et al.*, 2023). A compreensão aprofundada dessas dinâmicas é fundamental para a elaboração de estratégias eficazes de restauração e de gestão de rios não perenes, visando a restaurar padrões de fluxo que sustentem a heterogeneidade geomorfológica e a diversidade biológica inerentes a esses ecossistemas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os rios não perenes, ou sistemas IRES, são sistemas dinâmicos e complexos, cada vez mais comuns nas redes de drenagem globais, desempenhando funções ecológicas, biogeomorfológicas e hidrogeomorfológicas cruciais. Caracterizados por uma notável variabilidade hidrológica e por um ciclo complexo de fases de fluxo e seca, eles representam um desafio significativo para as classificações tradicionais e exigem uma abordagem unificada e integrada. O aumento global da intermitência e da efemeridade,

impulsionado por mudanças climáticas e, de forma acentuada, por pressões antrópicas, como a exploração insustentável de recursos hídricos, ressalta a urgência de uma compreensão aprofundada de suas dinâmicas e de seus impactos.

A aplicação da ciência da complexidade, ao reconhecer a não-linearidade, *os processos de retroalimentação*, as propriedades emergentes e as interações multifacetadas, oferece uma estrutura essencial para desvendar os processos biogeomorfológicos e hidrogeomorfológicos desses sistemas. Essa abordagem permite ir além da análise reducionista, focando na interconexão entre os componentes e na evolução conjunta do sistema fluvial. Ao adotar essas abordagens integrativas, que consideram o rio como um sistema complexo e coevolutivo, a comunidade científica e os gestores de recursos hídricos podem avançar significativamente na gestão e na conservação dos rios não perenes. Isso é vital para garantir a resiliência desses ecossistemas vitais e a manutenção dos serviços ecossistêmicos que eles prestam, diante das rápidas transformações ambientais do Antropoceno.

AGRADECIMENTO

Agradecemos ao Grupo de Estudos em Ambientes Fluviais Semiáridos (GEAFS) pela coleta de dados e pelo monitoramento dos sistemas IRES. À Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG-UFPB) pelo suporte financeiro e logístico às atividades de campo. Ao CNPq pelo apoio financeiro, por meio dos projetos 408389/2021-4, 408386/2023-1 e 311721/2022-2.

E ao Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração Rio Paraíba Integrado (PELD/RIPA), com o apoio do CNPq/MCTI/CONFAP-FAPESQ/PELD.UEPB nº 21/2020, pelo suporte financeiro e logístico.

REFERÊNCIAS

ALLEN, D. C.; DATRY, T.; BOERSMA, K. S.; BOGAN, M. T.; BOULTON, A. J.; BRUNO, D.; BUSCH, M. H.; COSTIGAN, K. H.; DODDS, W. K.; FRITZ, K. M.; GODSEY, S. E.; JONES, J. B.; KALETOVA, T.; KAMPF, S. K.; MIMS, M. C.; NEESON, T. M.; OLDEN, J. D.; PASTOR, A. V.; POFF, N. L.; RUDELL, B. L.; RUHI, A.; SINGER, G.; VEZZA, P.; WARD, A. S.; ZIMMER, M. River ecosystem conceptual models and nonperennial rivers: A critical review. **WIREs Water**, v. 7, e1473, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1473>

ALLEN, J. R. L. Reaction, relaxation, and lag in natural sedimentary systems: general principles, examples, and lessons. **Earth-Science Reviews**, v. 10, n. 4, p. 263–342, 1974. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(74\)90109-3](https://doi.org/10.1016/0012-8252(74)90109-3).

BRIGGS, M. A.; BUCKLEY, S. F.; BAGTZOGLU, A. C.; WERKEMA, D. D.; LANE, J. W. Actively heated high-resolution fiber-optic-distributed temperature sensing to quantify streambed flow dynamics in zones of strong groundwater upwelling. **Water Resources Research**, v. 52, p. 5179–5194, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015WR018219>.

BRUNSDEN, D.; THORNES, J. B. Landscape sensitivity and change. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 4, n. 4, p. 463–484, 1979. DOI <https://doi.org/10.2307/622210>.

CASHMAN, M. J.; HARVEY, G. L.; WHARTON, G. Structural complexity influences the ecosystem engineering effects of in-stream large wood. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 46, p. 2079–2091, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5145>.

CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical geography: a systems approach**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1971. 370p.

CRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 256p.

DATRY, T.; BOULTON, A. J.; FRITZ, K.; STUBBINGTON, R.; CID, N.; CRABOT, J.; TOCKNER, K. Non-perennial segments in river networks. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 4, p. 815-830, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00495-w>.

FRYIRS, K. A. River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, p. 55-70, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3940>.

GRAF, W. L. **Fluvial processes in dryland rivers**. Caldwell: The Blackburn Press, 1988. 346p.

GREGORY, K. J. **The nature of physical geography**. London: Edward Arnold, 1985. 558p.

GURNELL, A. M.; BERTOLDI, W. Plants and river morphodynamics: The emergence of fluvial biogeomorphology. **River Research and Applications**, v. 40, n. 6, p. 887–942, 2024. HOWARD, R. A. Uncertainty about probability: a decision analysis perspective. **Risk Analysis**, v. 8, n. 2, p. 227–234, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.4271>.

LEIGH, C.; BOULTON, A.; COURTWRIGHT, J.; FRITZ, K. Ecological research and management of intermittent rivers: an historical review and future directions. **Freshwater Biology**, v. 61, p. 1181–1199, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/fwb.12646>.

MESSAGER, M. L.; LEHNER, B.; COCKBURN, C.; LAMOUREUX, N.; PELLA, H.; SNELDER, T.; TOCKNER, K.; TRAUTMANN, T.; WATT, C.; DATRY, T. Global prevalence of non-perennial rivers and streams. **Nature**, v. 594, n. 7863, p. 395–399, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03565-5>.

ONOJEGHOU, A. O.; ONOJEGHOU, A. R.; COTTON, M.; POTTER, J.; JONES, B. Wetland mapping with multi-temporal Sentinel-1 & -2 imagery (2017–2020) and LiDAR data in the grassland natural region of Alberta. **GIScience & Remote Sensing**, v. 58, n. 7, p. 999–1021, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1952541>.

PHILLIPS, J. D. Nonlinear dynamic systems in geomorphology: revolution or evolution? **Geomorphology**, v. 5, n. 3–5, p. 177–186, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-03715-6>.

PHILLIPS, J. D. **Landscape evolution: landforms, ecosystems, and soils**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 356p.

RHOADS, B. L.; THORN, C. R. **The scientific nature of geomorphology: an introduction to the philosophy of geomorphology**. Nova York: John Wiley & Sons, 1996. 490p.

RODRIGUES, J. M.; SOUZA, J. O. P. de. Parameterization of flow intermittency and river styles in two hydrographic basins in the semiarid region of Paraíba. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 26, n. 3, 2025. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v26i3.2666>.

SANDERCOCK, P. J.; HOOKE, J. M. Vegetation effects on sediment connectivity and processes in an ephemeral channel in SE Spain. **Journal of Arid Environments**, v. 75, n. 3, p. 239–254, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.10.005>.

SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. Nova York: John Wiley & Sons, 1977. 360p.

SHAKEEL, A.; SCHMAHL, H.-P.; SCHÜTTRUMPF, H. Effect of organic matter degradation in cohesive sediment: a detailed rheological analysis. **Journal of Soils and Sediments, Dordrecht**, v. 22, p. 2038–2050, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03156-5>.

SOUZA, J. O. P. de; CORRÊA, A. C. de B. Análise da sensibilidade da paisagem na bacia do riacho do Saco – PE. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 4, 2015. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i4.777>.

STROMBERG, J. C.; BOUDELL, J. A. Floods, drought, and seed mass of riparian plant species. **Journal of Arid Environments**, v. 97, p. 99–107, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.05.012>.

THORNES, J. B.; BRUNSDEN, D. **Geomorphology and time**. Londres: Methuen & Co Ltd, 1977. 226p.

TRUCHY, A.; CSABAI, Z.; MIMEAU, L.; KUNNE, A.; PERNECKER, B.; BERTIN, W.; PELLIZZARO, F.; DATRY, T. Citizen scientists can help advance the science and management of intermittent rivers and ephemeral streams. **BioScience**, v. 73, n. 7, p. 513–521, 2023.

VALDATI, J.; SOUZA, P. C. Recognizing biogeomorphology: analysis of academic-scientific production and distribution of studies by geomorphological environments. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 26, n. 3, 2025.

DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v26i3.2686>.

VESIPA, R.; CAMPOREALE, C.; RIDOLFI, L. Effect of river flow fluctuations on riparian vegetation dynamics: processes and models. **Advances in Water Resources**, v. 110, p. 29–50, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.028>.