

Jeferson Mauricio Rodrigues

Mestre e doutorando em Geografia pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
jefersonmrgeo@gmail.com

Camilla Jerssica Silva Santos

Mestre e doutoranda em Geografia pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
camilla.jerssica@hotmail.com

Jonas Otaviano Praça de Souza

Doutor em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), professor do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq
jonasgeoufpe@yahoo.com.br

A Teoria do Não Equilíbrio e a dinâmica fluvial em rios não perenes de terras secas

Resumo

O texto discute a complexidade dos rios não perenes em terras secas, caracterizados por fluxos intermitentes e uma dinâmica influenciada por fatores como clima, geologia e uso da terra. Esses rios enfrentam desafios crescentes devido à degradação ambiental, impulsionada por práticas humanas, mudanças climáticas e ocupação desordenada. A análise dos rios não perenes revela que, ao contrário dos canais perenes, eles operam em um estado de não equilíbrio, com respostas hidrológicas não lineares e variadas. As mudanças geomórficas são muitas vezes reativas a eventos climáticos intensos e práticas inadequadas de uso da terra. O texto enfatiza que a recuperação de rios degradados requer uma abordagem integrada, considerando tanto a resiliência natural dos sistemas quanto as intervenções humanas. Estratégias como o controle de espécies invasoras e a reintrodução de flora nativa são destacadas como essenciais para a restauração ecológica. Por fim, a gestão adaptativa é necessária, dada a imprevisibilidade das dinâmicas não lineares e a variabilidade dos ecossistemas fluviais. A compreensão das interações entre fatores ambientais e as respostas dos rios é crucial para promover a sustentabilidade e a recuperação dos ecossistemas fluviais semiáridos.

Palavras-chave: Complexidade, Não-linearidade, Rios não perenes.

Abstract

THE NONEQUILIBRIUM THEORY AND FLUVIAL DYNAMICS IN NON-PERENNIAL DRYLAND RIVERS

The text discusses the complexity of non-perennial rivers in drylands, characterized by intermittent flows and dynamics influenced by factors such as climate, geology, and land use. These rivers face increasing challenges due to environmental degradation driven by human activities, climate change, and uncontrolled development. The analysis of non-perennial rivers reveals that, unlike perennial channels, they operate in a state of non-equilibrium, exhibiting nonlinear hydrological responses and variability. Geomorphological changes are often reactive to intense climatic events and inappropriate land-use practices. The text emphasizes that the recovery of degraded rivers requires an integrated approach, considering both the natural resilience of systems and human interventions. Strategies such as controlling invasive species and reintroducing native flora are highlighted as essential for ecological restoration. Finally, adaptive management is necessary due to the unpredictability of nonlinear dynamics and the variability of fluvial ecosystems. Understanding the interactions between environmental factors and river responses is crucial for promoting sustainability and the recovery of semi-arid fluvial ecosystems.

Key-words: Complexity, Non-linearity, Non-perennial rivers.

1. Introdução

Os rios não perenes, predominantes em regiões de terras secas, vêm ganhando destaque na literatura científica por apresentarem padrões hidrológicos e geomorfológicos distintos dos canais perenes (TOOTH, 2000; SHANAFIELD et al., 2021; DATRY et al., 2023). Esses sistemas fluviais caracterizam-se pela descontinuidade temporal e espacial do fluxo, sendo fortemente influenciados por fatores como clima, geologia, topografia e cobertura vegetal (COSTIGAN et al., 2017; WEKESA et al., 2020; RODRIGUES et al., 2023). Ao mesmo tempo, enfrentam crescentes pressões antrópicas decorrentes da intensificação do uso da terra, mudanças climáticas e intervenções estruturais, como represamento e extração de água subterrânea (BUFFINGTON; MONTGOMERY, 2013; ZIPPER et al., 2022; FIERRO et al., 2017).

Apesar de sua ampla representatividade em redes hidrográficas ao redor do mundo, a compreensão dos rios não perenes ainda é limitada, sobretudo quanto à aplicação de modelos conceituais desenvolvidos para

canais permanentes. Muitos desses modelos assumem um comportamento fluvial baseado em estados de equilíbrio e linearidade entre entradas e saídas de energia (PHILLIPS, 2006; ROSGEN, 1994), o que se mostra insuficiente para explicar a complexidade dinâmica dos rios de terras secas, que operam em estados transitórios e frequentemente instáveis (ADAMS, 2021; BRACKEN; WAINWRIGHT, 2006).

Neste contexto, a compreensão das dinâmicas de não equilíbrio, das fontes de não linearidade e da sensibilidade geomorfológica desses sistemas torna-se fundamental para repensar conceitos clássicos da geomorfologia fluvial (FRYIRS, 2017; BRIERLEY; FRYIRS, 2013), além de orientar estratégias mais adequadas de manejo, conservação e recuperação dos rios não perenes.

Este artigo tem como objetivo discutir os fundamentos teóricos que envolvem o equilíbrio, a sensibilidade e a evolução fluvial em rios não perenes de terras secas, a partir de uma revisão crítica da literatura especializada. A partir dessa análise, propõe-se uma reflexão sobre a adequação dos modelos conceituais vigentes e os desafios que se impõem para compreender e intervir nesses sistemas hidrológica e ecologicamente complexos.

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho adota como metodologia uma revisão crítica da literatura especializada, com foco em estudos que abordam a dinâmica fluvial em ambientes áridos e semiáridos, a partir da Teoria do Não Equilíbrio. A abordagem teórica está ancorada em autores que questionam modelos clássicos de equilíbrio geomorfológico e hidrológico, propondo alternativas baseadas na complexidade, na não linearidade e na sensibilidade dos sistemas naturais. O corpus teórico foi selecionado com base em sua relevância para a compreensão das dinâmicas fluviais sazonais, com destaque para os trabalhos de Phillips (2006, 2011), Brierley e Fryirs (2013), Fryirs (2017) e Wohl (2021), entre outros, que fornecem o suporte conceitual para reavaliar a aplicabilidade de modelos perenes a rios não perenes.

2. Dinâmica hidrológica e geomorfológica de rios não perenes em terras secas: desafios e compreensões

Terras secas podem referir-se a qualquer área que apresente extrema aridez, aridez e semiaridez (CAVALCANTI et al., 2006; TOOTH, 2000). As terras secas são caracterizadas geralmente por serem áreas de pouca chuva, no entanto, os detalhes de sua superfície são atribuídos à atuação dos sistemas fluviais. Logo, compreender as paisagens de terras secas é entender os processos e formas fluviais (THOMAS, 2011), inclusive dos rios não perenes. Todavia, nas últimas décadas, a legislação ambiental e a crescente perturbação humana vista na forma de ocupação desenfreada de sistemas fluviais bem como a necessidade de garantir o abastecimento de água potável para a população desencadeou o esforço coletivo entre cientistas e gestores de terras para compreender e monitorar esses rios (BUFFINGTON; MONTGOMERY, 2013).

Rios não perenes são geralmente caracterizados como canais intermitentes ou riachos efêmeros, considerando a sua descontinuidade espacial e temporal de fluxo (MALLIN-COOPER; ZAMPATTI, 2020; SHANAFIELD et al., 2021; SOUZA; HOOKE, 2021; TOOTH, 2000; WEKESA et al., 2020). O início de um escoamento não perene depende da interrelação entre elementos controladores do sistema ambiental como geologia, clima, topografia e vegetação (COSTIGAN et al., 2017; SHANAFIELD et al., 2021). Eles representam mais da metade das extensões de escoamentos fluviais do mundo (DATRY et al., 2023). Há, inclusive, um aumento na intermitência de uma série de sistemas fluviais, sendo um resultado dos diferentes tipos de uso da terra, mudanças climáticas e extração de água subterrânea de maneira exagerada.

Rios não perenes possuem duração e frequência de fluxo diferentes de rios de ambientes úmidos, pois têm sua resposta hidrológica diretamente relacionada com a dinâmica de precipitação, geralmente caracterizada por eventos de curta duração e mal distribuídos no espaço geográfico (ALLEN et al., 2020; RODRIGUES, 2020; SHANAFIELD et al., 2021; WEKESA et al., 2020), sendo a manutenção do fluxo por aquíferos pontual ou ausente, respondendo à entrada de água no canal através da área de captação de chuva, o que gera vazão por área de contribuição (SHANAFIELD et al.,

2021). Nesse sentido, teoricamente, quando mais próximos das zonas de cabeceira, mais pontuais são os eventos de vazão por conta da menor área de contribuição.

É importante ressaltar que a frequência e a duração dos eventos de vazão estão relacionadas não apenas aos padrões de precipitação e à área de captação dos trechos, mas também aos materiais de margem/leito dos canais. Trechos com leito rochoso, ou em áreas predominantemente rochosas, respondem mais rapidamente aos eventos de precipitação, gerando eventos de vazões mais frequentes, porém de curta duração (RODRIGUES et al., 2023).

Por outro lado, rios com presença de aluvião, comuns em rios intermitentes em ambientes semiáridos, apresentam uma capacidade significativa de armazenamento de água na aluvião (ocorrendo entre eventos de escoamento) do canal nas áreas de maior área de contribuição (RODRIGUES; SOUZA, 2020a; RODRIGUES; SOUZA, 2020b; RODRIGUES; SOUZA; XAVIER, 2021). A ocorrência de eventos de vazão superficial é dependente da condição de saturação da zona hiporreica, sendo comum a perda de transmissão/vazão por infiltração no leito (COSTA et al., 2013; COSTA; BRONSTERT; DE ARAÚJO, 2012). Tal característica dificulta a previsibilidade de um limiar de volume e frequência específicos de precipitação para gerar vazão (DATRY et al., 2023).

Assim, rios não perenes são hidrologicamente e ecologicamente distintos de canais perenes, o que remete à questão se a base conceitual e os modelos teórico-metodológicos desenvolvidos para canais perenes são realmente aplicáveis a canais de terras secas (ALLEN et al., 2020).

Para pensar em possibilidades de ajuste em ambientes fluviais de rios não perenes, é importante considerar a base conceitual e a dinâmica espaço-temporal desses canais. Nesse sentido, a questão conceitual da evolução em rios não perenes necessita de separação entre o **comportamento natural e a mudança fluvial**.

O comportamento natural de um rio pode ser entendido como o padrão morfológico do canal no tempo e no espaço, regido por uma dinâmica frequente. Por exemplo, um rio não perene passa a maior parte do ano seco por conta da irregularidade dos volumes pluviométricos que são incapazes de recarregar os lençóis freáticos, inibindo a dinâmica fluvial

por fluxo ausente, o que implica em uma manutenção das formas durante a maior parte do ano, mas, após o início do período chuvoso, a morfologia do rio pode ser alterada. Todavia, essa alteração não implica em mudanças no comportamento do rio, mas, apenas ajustes esporádicos nas unidades geomórficas presentes no ambiente fluvial (ALLEN et al., 2020; RODRIGUES et al., 2023). Como as mudanças ocorrentes geralmente não são previsíveis, esse comportamento natural pode ser considerado como não linear, por gerar respostas complexas (RODRIGUES; SOUZA; XAVIER, 2021).

Outro exemplo ocorre em rios meandранtes, nos quais o comportamento normal de um meandro passivo é a manutenção de sua forma e as mudanças rápidas não são comuns, entretanto, no meandro ativo, é possível ocorrer migração lateral e, conseqüentemente, ajuste fluvial (CASADO; PEIRY; CAMPO, 2016).

É importante destacar que o ajuste nas unidades geomórficas não significa alteração no comportamento de um rio, pois existem canais que migram constantemente em seu comportamento normal. Desse modo, alterações geomórficas não são necessariamente mudanças de comportamento fluvial (RODRIGUES et al., 2023). Entretanto, os comportamentos fluviais podem estar dentro de uma perspectiva **equilibrada ou não-equilibrada** (NANSON; HUANG, 2016; HUGGET, 2007; LANKFORD; BEALE, 2007).

3. Não equilíbrio em rios não perenes

A discussão de equilíbrio/não equilíbrio desempenha um papel de suma importância, quando os aspectos geomorfológicos são acerca de resistência, mudança e resposta nos sistemas ambientais (PHILLIPS, 2009; WOHL, 2021). Historicamente, os estudos baseados em equilíbrio apontam para uma determinada estabilidade/permanência de formas e processos na paisagem, como se a natureza tendesse a um estado estacionário, no qual a preservação das formas e a dinâmica no tempo induzissem um comportamento esperado linear entre entradas e saídas de energia, sendo essa última relação linear à proporcionalidade (PHILLIPS, 2006).

Mas a natureza está longe de um comportamento linear de causa e efeito (BRIERLEY et al., 2021).

Nesse sentido, a relação entre os balanços de forças de perturbação e resistência buscam um equilíbrio na paisagem, o qual está ligado ao estado de estabilidade do sistema, no qual os sistemas estáveis apresentam magnitude e duração das respostas proporcionais aos eventos de distúrbio. A ideia de classificação de rios naturais empregada nos estudos de Rosgen (1994) aponta para a consideração de rios em condição de estado estacionário de mudança, como se um canal natural apresentasse sempre uma condição equilibrada/estável na natureza (PHILLIPS, 2011). Em contrapartida, as respostas desproporcionais aos eventos de perturbação caracterizam os sistemas não equilibrados, ou seja, instáveis (ADAMS, 2021; HUGGETT, 2007).

A questão do equilíbrio baseada na ideia de estado estacionário aplicada em canais de terras secas pode ser facilmente rebatida ao considerar definições estabelecidas e fechadas sobre esse tema (ADAMS, 2021). Howard (1988 apud PHILLIPS, 1992) estabeleceu uma definição formal e rigorosa sobre o tema afirmando que o equilíbrio em um sistema só existe caso uma mudança na entrada cause outra mudança mensurável na saída, imediatamente ou após um tempo determinado. Todavia, o comportamento do escoamento e a vazão em pulsos não estão dentro de uma perspectiva equilibrada, pois mensurar a saída de energia em um sistema com diversos limiares e não linearidades impedem que essa entrada-saída seja invariável (PHILLIPS, 1992, 2011). Além disso, pequenos eventos de baixa magnitude podem gerar consequências enormes em um sistema e eventos curtos podem gerar consequências longas (PHILLIPS, 2006).

Outra dificuldade em demonstrar a existência de equilíbrio através da busca por um estado estacionário é a divulgada ideia de perfil longitudinal côncavo, no qual um rio busca ajustar seu perfil longitudinal para compensar a relação entre capacidade de transporte e disponibilidade de sedimentos. Chen et al. (2019) indicam que em ambientes de terras secas os perfis longitudinais tendem a ser convexos ou aplainados, considerando a alta variabilidade das chuvas temporal e espacialmente, recorrendo apenas uma parte da bacia hidrográfica e com pouca contribuição

na vazão do canal principal. Essa vazão em pulsos diminui o processo de entalhamento do talvegue e consequentemente a evolução do perfil longitudinal para um modelo “equilibrado”. Entretanto, tipos de morfologias equilibradas dificilmente são encontradas na natureza de forma linear e o estado estacionário permanente em um ambiente natural geralmente está ausente. De modo contrário, a perspectiva de não-equilíbrio do sistema fluvial de terras secas, ou seja, a predominância da instabilidade morfológica é a forma de entendimento mais adequada (CHEN et al., 2019; PHILLIPS, 2011).

Stott (1998) apud Bracken e Wainwright (2006) sugeriu que o não-equilíbrio é uma representação mais aproximada da realidade dos sistemas ambientais e que os pesquisadores se prendem erroneamente ao conceito de equilíbrio. As condições de equilíbrio raramente existem em áreas semiáridas e o comportamento transitório e não equilibrado é mais comum (BRACKEN; WAINWRIGHT, 2006). O estado estacionário em um rio não perene só pode ocorrer durante o período seco, quando não há trabalho mecânico para gerar transporte ou deposição de sedimento, ou seja, esses momentos em que o rio não apresenta pulsos de inundação podem ser vistos como estados estacionários de transição (ADAMS, 2021; PHILLIPS, 2006).

Esse estado estacionário durante o período seco demonstra um comportamento previsível em rios não perenes, mesmo sendo não lineares, onde a linearidade pode ser previsível em momentos estáticos (PHILLIPS, 2003). Todavia, esses momentos estáticos são superados ao passo que o limite de resistência do sistema é superado pela força esporádica em rios não perenes (escoamento em pulsos), que pode gerar respostas complexas não lineares generalizadas nas unidades geomórficas (LI et al., 2021).

Quadro 1**REFERÊNCIAS CONCEITUAIS SOBRE COMPORTAMENTO LINEAR E NÃO LINEAR EM SISTEMAS AMBIENTAIS**

Autor(es)	Temática Principal
Phillips (2003, 2006, 2009, 2011)	Crítica à ideia de equilíbrio linear; defesa de sistemas com múltiplos limiares e comportamento não linear; imprevisibilidade de respostas em sistemas fluviais.
Wohl (2021)	Discussão sobre resistência, mudança e resposta em sistemas ambientais dentro da abordagem de equilíbrio/não equilíbrio.
Brierley et al. (2021)	Natureza não linear dos sistemas ambientais; rejeição do modelo de causa e efeito direto.
Rosgen (1994)	Classificação de rios com base na ideia de equilíbrio morfológico; canais em estado estacionário de mudança.
Adams (2021)	Crítica à aplicação da ideia de estado estacionário em canais de terras secas; defesa do conceito de estados estacionários transitórios e instabilidade predominante.
Huggett (2007)	Apoio à visão de sistemas instáveis com respostas desproporcionais a distúrbios.
Howard (1988 apud Phillips, 1992)	Definição formal de equilíbrio: mudança na entrada deve resultar em mudança mensurável na saída.
Chen et al. (2019)	Perfis longitudinais não côncavos em ambientes áridos; defesa de morfologias instáveis e sistemas não equilibrados.
Stott (1998 apud Bracken; Wainwright, 2006)	O não-equilíbrio é mais realista para representar sistemas ambientais, especialmente em áreas semiáridas.
Bracken; Wainwright (2006)	Predominância do comportamento não equilibrado e transitório em ambientes semiáridos.
Li et al. (2021)	Respostas geomórficas complexas em rios não perenes devido a forças esporádicas e comportamento em pulsos.

Fonte: Autores (2025).

A discussão entre equilíbrio e não equilíbrio nos sistemas fluviais, especialmente em ambientes de terras secas, tem sido abordada por diversos autores que questionam a linearidade e a previsibilidade dos processos geomorfológicos. O quadro 1 sintetiza os principais estudos e autores que contribuíram para esse debate, destacando suas respectivas abordagens sobre a estabilidade morfológica, os estados estacionários e as respostas não lineares dos sistemas ambientais.

4. Fontes de não linearidade e controles de mudanças fluviais

As fontes de não linearidade são possibilidades de ajuste geomórfico frente à influência de entorno dos ambientes fluviais semiáridos, considerando a quantidade de variáveis/elementos com seus respectivos graus de liberdade e que podem responder de maneira variável a alterações nos *inputs* de energia. Entretanto, a auto-organização de sistemas geomórficos depende do tipo de estabilidade existente (MATTOS; FILHO, 2004). As perguntas-chave são: Um determinado comportamento fluvial analisado é natural ou antrópico? As mudanças são graduais ou catastróficas?

O tempo de alteração geomórfica em rios não perenes depende do tipo de unidade existente no ambiente fluvial. Nessa perspectiva, o tempo de mudança em terras secas vai depender do tempo e da escala de investigação. Assim, na escala de bacia, não é possível perceber mudanças abruptas que ocorrem interanualmente em ambientes fluviais arenosos, tendo em vista a necessidade de maiores temporalidades para ocorrer as mudanças nas unidades de paisagem (THOMAS, 2004). Todavia, barras arenosas que mudam gradualmente são relacionadas ao comportamento gradual da vazão e grandes eventos de cheia podem causar mudanças rápidas e generalizadas nas unidades geomórficas do ambiente fluvial (FRYIRS; BRIERLEY, 2013).

O que determina se vai ocorrer alteração em um rio são limiares de mudança, ou seja, quais determinadas alterações geomórficas são esperadas para cada tipo de rio (PHILLIPS, 2009; WOHL, 2021). Essas alterações podem ser medidas em parâmetros de análise fluvial, como: confinamento, número de canais, textura, unidades geomórficas, estabilidade de margem, sinuosidade etc. (BRIERLEY; FRYIRS, 2013; REID; BRIERLEY, 2015).

É importante salientar que a utilização de dados socioeconômicos pode ser interessante quando não se dispõe de dados para analisar determinado evento extremo, como dados agropecuários, econômicos ou, até mesmo, fotos antigas de algum morador local (FRYIRS; BRIERLEY, 2009). No semiárido brasileiro, geralmente os dados de uso e ocupação são ignorados pela comunidade acadêmica em suas análises.

5. Mudança, degradação e recuperação em ambientes fluviais semiáridos

Pensando em mudança em rios não perenes de terras secas, a preocupação crescente com sistemas fluviais degradados gerou nas últimas décadas o crescente interesse pela reabilitação desses canais (FRYIRS, 2003). Entretanto, o conceito de sensibilidade da paisagem (propensão à mudança) caiu em desuso nos últimos anos, o que dificulta a busca pelo conhecimento acerca da evolução da paisagem em sistemas fluviais (FRYIRS, 2017).

Apesar do reconhecimento de longa data, desde a década de 1920, do conceito de sensibilidade na geomorfologia fluvial, ocorreram poucas tentativas de desenvolver uma abordagem sistemática e consistente para analisar a sensibilidade de rios (REID; BRIERLEY, 2015). A sensibilidade pode ser entendida como a probabilidade de uma determinada mudança nos controles de um sistema que produza respostas sensíveis, reconhecíveis e persistentes. Desta maneira, a questão da sensibilidade abrange dois aspectos: (1) a propensão à mudança; (2) a capacidade do sistema em absorver a mudança. Ou seja, é uma relação entre forças de distúrbio e resistência, o que pode gerar respostas complexas (BRUNSDEN, 2001; RODRIGUES; SOUZA; XAVIER, 2021).

A resistência pode ocorrer na estrutura da paisagem, como as propriedades físicas e químicas de uma rocha que podem responder aos processos hidrológicos e erodibilidade. A resistência também pode ser morfológica, na qual o grau de inclinação do relevo irá determinar o potencial energético da água e, conseqüentemente, definir a velocidade dos processos de incisão fluvial no terreno. Brunsdén (2001) fala sobre transmissões de impulsos na paisagem e como isso influencia na dissipação de energia e na manutenção das formas. É importante destacar também a existência de filtros de resistência; a energia utilizada para realizar trabalho mecânico, absorção e ajuste da forma são parâmetros para minimizar a utilização e o acúmulo de energia (BRUNSDEN, 2001).

Os ambientes fluviais do semiárido enfrentam uma série de desafios que levam à degradação significativa de seus leitos e margens. Um dos principais fatores contribuintes é a variabilidade extrema das condições

hidrológicas, caracterizada por períodos curtos de intensas chuvas seguidos por longas secas (SOUZA; ALMEIDA, 2015; ZIPPER et al., 2022). Esses eventos causam erosão acelerada das margens dos rios e contribuem para a sedimentação excessiva nos leitos fluviais, pela grande quantidade de carga sedimentar produzida (XAVIER, 2021).

Além disso, as mudanças hidrológicas induzidas por atividades humanas têm exacerbado os processos de degradação nos ambientes fluviais do semiárido (FIERRO et al., 2017). A construção de barragens e a retirada excessiva de água para irrigação alteram o regime natural dos rios, diminuindo o fluxo de base durante os períodos de seca e aumentando a ocorrência de eventos de fluxo intenso durante a estação chuvosa. Práticas agrícolas inadequadas e o desmatamento das áreas de vegetação ripária aumentam a vulnerabilidade do ambiente fluvial (BRACKEN et al., 2013; REN et al., 2021; WU et al., 2021).

A introdução de espécies invasoras é outro fator que contribui para a degradação dos ambientes fluviais semiáridos. Espécies como a algaroba (*Prosopis juliflora*) e a leucena (*Leucaena leucocephala*), que competem com a vegetação nativa por recursos hídricos e nutrientes, alteram a composição do solo e reduzem a biodiversidade das espécies nativas, afetando a resistência a eventos de chuvas intensas (SHIFERAW et al., 2023; WEIDENHAMER; CALLAWAY, 2010). Essas espécies facilitam a entrada de outras espécies invasoras e pragas, criando um ciclo vicioso de degradação ambiental. Para enfrentar esses desafios, estratégias de manejo incluem o controle mecânico e químico dessas espécies invasoras, reintrodução de espécies nativas adaptadas ao clima semiárido e o engajamento das comunidades locais em práticas sustentáveis de uso da terra. A combinação dessas abordagens é essencial para promover a resiliência e a recuperação de ecossistemas degradados de ambientes fluviais semiáridos, garantindo a sustentabilidade ambiental a longo prazo (ARAÚJO et al., 2014; SHIFERAW et al., 2023).

A recuperação geomórfica dos rios é um processo natural que reflete a capacidade de autocura dos sistemas fluviais, especialmente em contextos em que a degradação predominou. A literatura destaca que, embora o conceito de recuperação de rios tenha sido amplamente discutido na ecologia, a compreensão geomórfica desse processo é relativamente recente, sendo

estruturada apenas nos anos 2000. Avaliar a recuperação geomórfica é fundamental para entender como os rios se ajustam às mudanças ambientais e como suas trajetórias evolutivas podem ser gerenciadas para favorecer a resiliência e adaptação. Essas análises permitem o desenvolvimento de estratégias de manejo mais avançadas, como as iniciativas de “espaço para se mover” e “rios de liberdade”, que dão ao rio a capacidade de se ajustar de maneira autônoma (BRIERLEY et al., 2021; FRYIRS; BRIERLEY, 2013; REID; BRIERLEY, 2015).

No entanto, as dinâmicas não lineares e respostas induzidas por limiar tornam difícil prever com precisão o curso da recuperação de um rio, o que implica uma gestão mais cautelosa e adaptativa. O modelo de *River Styles* identifica três principais trajetórias de ajuste geomórfico (degradação, restauração e criação) e cinco estados-chave que vão desde condições intactas até o ponto de inflexão e restauração, propondo um caminho integrado para a recuperação dos sistemas fluviais e sua resiliência frente às pressões ambientais (BRIERLEY; FRYIRS, 2005; FRYIRS; BRIERLEY, 2018; RODRIGUES et al., 2023).

6. Considerações finais

Por fim, rios não perenes apresentam sistemas não equilibrados sazonais, mas com estados estacionários de transição interanual entre os pulsos de inundação que ocorrem durante o período chuvoso, gerando trabalho mecânico (ZIPPER et al., 2022). Por exemplo, Rodrigues, Souza e Xavier (2021), ao analisar a sensibilidade em trechos de um rio não perene, apontam o tamanho dos trechos e o período de análise, para, então, após as definições dos parâmetros, definirem as modificações geomórficas e os controladores ambientais envolvidos nas mudanças. As entradas e saídas de energia foram variáveis funcionando em pulsos de vazão (LI et al., 2021), alterando a presença/a ausência de unidades geomórficas na escala de canais como barras, ilhas e planícies de inundações (RODRIGUES; SOUZA; XAVIER, 2021).

A análise desenvolvida evidencia que os rios não perenes em ambientes semiáridos operam dentro de um paradigma de não equilíbrio,

no qual respostas geomorfológicas não lineares e comportamentos transitórios são a norma. Esse entendimento demanda a superação de modelos teóricos baseados na linearidade e na previsibilidade, historicamente aplicados aos canais perenes. Em termos teóricos, o desafio está em consolidar abordagens que reconheçam os múltiplos limiares de resposta e a alta sensibilidade dos sistemas fluviais de terras secas.

Para a pesquisa aplicada, destaca-se a necessidade de desenvolver indicadores operacionais de sensibilidade e resiliência fluvial, capazes de orientar políticas de manejo adaptativo, monitoramento hidrossedimentológico e estratégias de restauração ecológica. Além disso, é fundamental integrar dados socioambientais, históricos e participativos para compreender os efeitos das ações antrópicas e planejar intervenções em escala local. O avanço nessa agenda depende da colaboração entre a geomorfologia teórica, a ecologia da paisagem e as ciências sociais aplicadas.

Referências

- ADAMS, D. L. Morphodynamics of an erodible channel under varying discharge. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 46, n. 12, p. 2414-2420, 2021.
- ALLEN, D. C. et al. River ecosystem conceptual models and non-perennial rivers: A critical review. **WIREs Water**, v. 7, n. 5, e1473, 2020.
- ARAÚJO, A. S. F. et al. Soil bacterial diversity in degraded and restored lands of Northeast Brazil. **Antonie van Leeuwenhoek, International Journal of General and Molecular Microbiology**, v. 106, n. 5, p. 891-899, 7 out. 2014.
- BRACKEN, L. J. et al. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, Pathways and future agendas. **Earth-Science Reviews**, v. 119, n. 3-4, p. 17-34, abr. 2013.
- BRACKEN, L. J.; WAINWRIGHT, J.. Geomorphological equilibrium; myth and metaphor? **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 31, n. 2, p. 167-178, june 2006.
- BRIERLEY, G.; FRYIRS, K. A. **Geomorphology and river management: applications of the river styles framework**. [s.l.] John Wiley e Sons, 2013.
- BRIERLEY, G. et al. The dark art of interpretation in geomorphology. **Geomorphology**, v. 390, 1. October 2021, 107870.

BRIERLEY, G. J.; FRYIRS, K. A. **Geomorphology and River Management Applications of the River Styles Framework**. Malden, MA: Blackwell Publishing, 2005.

BRUNSDEN, D. A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. **Catena**, v. 42, n. 2-4, p. 99-123, 2001.

BUFFINGTON, J. M.; MONTGOMERY, D. R. Geomorphic Classification of Rivers. **Treatise on Geomorphology**, v. 9, p. 730-767., 2013.

CASADO, A.; PEIRY, J. L.; CAMPO, A. M. Geomorphic and vegetation changes in a meandering dryland river regulated by a large dam, Sauce Grande River, Argentina. **Geomorphology**, v. 268, p. 21-34, 2016.

CAVALCANTI, E. R. et al. Desertificação e desastres naturais na região do semiárido brasileiro. **Caderno de Estudos Sociais**, v. 22, n.1, p. 019-032, jan./jun. 2006.

CHEN et al. Aridity is expressed in river topograpgy globally. **Nature**, v. 573, n. 7775, p. 573-577, 2019.

COSTA, A. C. et al. Analysis of channel transmission losses in a dryland river reach in north-eastern Brazil using streamflow series, groundwater level series and multi-temporal satellite data. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 7, p. 1046-1060, 30 mar. 2013.

COSTA, A. C.; BRONSTERT, A.; DE ARAÚJO, J. C. A channel transmission losses model for different dryland rivers. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 4, p. 1111-1135, 2012.

COSTIGAN, K. H. et al. Chapter 2.2 - Flow Regimes in Intermittent Rivers and Ephemeral Streams. In: DATRY, T.; BONADA, N.; BOULTON, A. (Ed.). **Intermittent Rivers and Ephemeral Streams**. [s.l.] Academic Press, 2017. p. 51-78.

DATRY, T. et al. Non-perennial segments in river networks. **Nature Reviews Earth and Environment**, v. 4, p. 815-830, dez. 2023.

FIERRO, P. et al. Effects of local land-use on riparian vegetation, water quality, and the functional organization of macroinvertebrate assemblages. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 724-734, jul. 2017.

FRYIRS, K. A. Guiding principles for assessing geomorphic river condition: Application of a framework in the Bega catchment, South Coast, New South Wales, Australia. **Catena**, v. 53, n. 1, p. 17-52, 1. ago. 2003.

FRYIRS, K. A. River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, n. 1, p. 55-70, 1. jan. 2017.

FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G. J. What's in a name? A naming convention for geomorphic river types using the river styles framework. **PLOS ONE**, v. 13, n. 9, e0201909, 1. set. 2018.

FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G. **Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape**. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2013.

FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G. Naturalness and place in river rehabilitation. **Ecology and Society**, v. 14, n. 1, 2009.

HUGGETT, R. A history of the systems approach in geomorphology. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v. 13, n. 2, p. 145-158, 1. jul. 2007.

LANKFORD, B.; BEALE, T. Equilibrium and non-equilibrium theories of sustainable water resources management: Dynamic River basin and irrigation behavior in Tanzania. **Global Environmental Change**, v. 17, n. 2, p. 168-180, 2007.

LI, Y. et al. Refining the concept of hydrological connectivity for large floodplain systems: Framework and implications for eco-environmental assessments. **Water Research**, v. 195, 1. maio 2021.

MALLEN-COOPER, M.; ZAMPATTI, B. P. Restoring the ecological integrity of a dryland river: Why low flows in the Barwon–Darling River must flow. **Ecological Management and Restoration**, v. 21, n. 3, p. 218-228, 1 set. 2020.

MATTOS, S. H. V. L. DE; FILHO, A. P. Complexidade e Estabilidade em Sistemas Geomorfológicos: uma introdução ao tema. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 5, n. 1, p. 11-18, 2004.

NANSON, G.; HUANG, H. A philosophy of rivers: Equilibrium states, channel evolution, teleomatic change and least action principle. **Geomorphology**, v. 302, n. 2, p. 3-19, jul. 2016.

PHILLIPS, J. D. The end of equilibrium? **Geomorphology**, v. 5, n. 3-5, p. 195–201, ago. 1992.

PHILLIPS, J. D. Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems. **Progress in Physical Geography**, v. 27, n. 1, p. 1-23, 2003.

PHILLIPS, J. D. Deterministic chaos and historical geomorphology: A review and look forward. **Geomorphology**, v. 76, n. 1-2, p. 109-121, 2006.

PHILLIPS, J. D. Changes, perturbations, and responses in geomorphic systems. **Progress in Physical Geography**, v. 33, n. 1, p. 17-30, 2009.

PHILLIPS, J. D. Emergence and pseudo-equilibrium in geomorphology. **Geomorphology**, v. 132, n. 3-4, p. 319-326, 2011.

REID, H. E.; BRIERLEY, G. J. Assessing geomorphic sensitivity in relation to river capacity for adjustment. **Geomorphology**, v. 251, p. 108-121, 15 dez. 2015.

REN, L. et al. Interannual variation in riparian vegetation cover and its relationship with river flow under a high level of human intervention: an example from the Yongding River Basin. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 7, 1 jul. 2021.

RODRIGUES, J. M. Espacialização das chuvas em uma bacia hidrográfica no Semiárido da Paraíba. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 6, n. 1, p. 28-35, 2020.

RODRIGUES, J. M. et al. Geomorphic changes in river styles in a typical catchment of the Brazilian semiarid region. **CATENA**, v. 232, n. 3-4, p. 107423, 2023.

RODRIGUES, J. M.; SOUZA, J. O. P. de. Typology of fluvial channels as a mechanism for the identification of sensitivity and potential for recovery in a drainage basin in the Semiarid of Paraíba – municipality of São João do Tigre (PB). **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 6, n. 2, p. 266-276, 2020a.

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. 650-667, 2020b.

RODRIGUES, J. M.; SOUZA, J. O. P. de. Estilos fluviais do alto curso do rio Piranhas, ambiente semiárido (PB). **Revista de Geografia**, v. 38, n. 1, p. 347-364, 27 abr. 2021.

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.

ROSGEN, D. A Classification of Natural Rivers. **Catena**, v. 22, n. 3, p. 169-199, jun. 1994.

SHANAFIELD, M. et al. An overview of the hydrology of non-perennial rivers and streams. **WIREs Water**, v. 8, n. 2, mar. 2021.

SHIFERAW, H. et al. Water abstraction of invasive *Prosopis juliflora* and native *Senegalia senegal* trees: A comparative study in the Great Rift Valley Area, Ethiopia. **Science of the Total Environment**, v. 862, mar. 2023, 160833.

SOUZA, J. O. P. de; ALMEIDA, J. D. M. de. Processos fluviais em terras secas: uma revisão. **OKARA: Geografia em debate**, v. 9, n. 1, p. 108-122, 2015.

SOUZA, J.; HOOKE, J. Influence of seasonal vegetation dynamics on hydrological connectivity in tropical drylands. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 11, nov. 2021.

THOMAS, D. S. G. **Arid zone geomorphology**: process, form and change in drylands. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2011.

THOMAS, M. F. Landscape sensitivity to rapid environmental change - A Quaternary perspective with examples from tropical areas. **Catena**, v. 55, n. 2, p. 107-124, jan. 2004.

TOOTH, S. Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research. **Earth-Science Reviews**, v. 51, n. 1-4, p. 67-107, ago. 2000.

WEIDENHAMER, J. D.; CALLAWAY, R. M. Direct and indirect effects of invasive plants on soil chemistry and ecosystem function. **Journal of Chemical Ecology**, v. 36, n. 1, p. 59-69, fev. 2010.

WEKESA, S. S. et al. Water Flow Behavior and Storage Potential of the Semi-Arid Ephemeral River System in the Mara Basin of Kenya. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, jul. 2020.

WOHL, E. An Integrative Conceptualization of Floodplain Storage. **Reviews of Geophysics**, v. 59, n. 2, p. 1-63, 2021.

WU, C. L. et al. Assessing the potential of riparian reforestation to facilitate watershed climate adaptation. **Journal of Environmental Management**, v. 277, jan. 2021.

XAVIER, R. Processos geomorfológicos e evolução da paisagem no semiárido brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 1, p. 59-69, 2021.

ZIPPER, S. et al. Alternative stable states and hydrological regime shifts in a large intermittent river. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 7, jul. 2022.

Recebido em 10/05/2025

Aceito em 03/06/2025