



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 11, nº 2 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n2ID40071>



Fenômenos de Transporte na Paisagem: Conectividade Lateral e Transporte de sedimento Fluvial

Transport Phenomena on The Landscape: Lateral Connectivity And Fluvial Sediment Transport

Jose Ramon Barros Cantalice¹; Juliana Farias Santos Moraes²; Luan Carlos Andrade Santos³; Wagner Luis Silva Souza⁴

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Recife-PE, Brasil. E-mail: Ramoncanta21@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8209-341X>

² Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Recife-PE, Brasil. E-mail: julianafsmoraes@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3241-844X>

³ Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Recife-PE, Brasil. E-mail: luan.santss@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9711-4482>

⁴ Instituto Federal de Barreiros-PE, Brasil. Email: wagner.souza@barreiros.ifpe.edu.br; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3839-2305>

Resumo: O transporte fluvial de sedimentos na forma de carga de fundo e sedimento suspenso está ligado à precipitação-escoamento gerando erosão hídrica em encostas de bacias hidrográficas. Portanto, a conectividade entre o fenômeno de transporte de sedimentos em encostas de bacias hidrográficas e as taxas de transporte de sedimentos em rios pode ligar questões como o fluxo lateral à resistência ao livre escoamento superficial, gerando impedância/resistência ao transporte lateral de sedimentos em encostas. Esta pesquisa foi conduzida para determinar o transporte de sedimentos em suspensão de encostas de três bacias hidrográficas brasileiras e abordar seus valores de curva número para expressar esse transporte. O transporte lateral de sedimentos constituído por sedimentos em suspensão sendo desagregados e transportados nas encostas foi expresso por meio de um ajuste linear aos valores de CN da bacia hidrográfica. Além disso, as relações lineares entre a quantidade de sedimento em suspensão adicionada à carga de fundo e a tensão de cisalhamento foram aplicadas com sucesso aqui para alcançar a erodibilidade do solo na escala da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: conectividade lateral de sedimentos; paisagem; tensão de cisalhamento crítica da bacia hidrográfica; erodibilidade da bacia hidrográfica; número de curvas; transporte de sedimentos em suspensão em encostas.

Abstract: Fluvial sediment transport as bedload and suspended sediment is linked to rainfall-runoff and water erosion on watershed hillslopes. Therefore, the connectivity between the sediment transport phenomenon in watershed hillslopes and sediment transport rates in rivers may link issues such as lateral flow to resistance to the water surface, generating impedance/resistance to lateral sediment transport on hillslopes. This research was conducted to determine the suspended sediment transport from hillslopes from three Brazilian watersheds and address their curve number values to address this idea. The lateral sediment transport constituted by suspended sediment being detached and transported on the hillslopes was a linear adjustment to the watershed CN values. Additionally, the linear relationships among the amount of suspended sediment added to the bedload, and shear stress were successfully applied here to achieve soil erodibility at the watershed scale.

Keywords: lateral sediment connectivity; landscape; watershed critical shear stress; watershed erodibility; curve number; suspended sediment transport on hillslopes.

Recebido: 02/05/2025; Aceito: 23/06/2025; Publicado: 01/07/2025.

1. Introdução

O sedimento fluvial transportado como carga de fundo e sedimento em suspensão está ligado ao escoamento pluvial, resultando em erosão hídrica nas encostas das bacias hidrográficas. Inicialmente, todo o sedimento é desprendido e transportado devido a todos os tipos de erosão hídrica ou fontes de sedimento: erosão entre sulcos, erosão em sulcos, ravinas e erosão em ravinas, que são conhecidas em conjunto como erosão bruta. No entanto, apenas uma fração da erosão bruta atinge o canal principal da bacia hidrográfica, o rio. Uma parte significativa do sedimento desprendido é depositada nas encostas ou no sistema de drenagem da bacia hidrográfica; não havendo impedimento livre ao fluxo, e o fluxo transporta sedimento. Como representamos essa resistência ao fluxo carregado de sedimento? Como a resistência ao fluxo e ao transporte nas encostas pode ser ligada ao transporte de sedimento fluvial?

O termo "conectividade" é atualmente aplicado em processos hidrológicos e de formação de paisagens; Bracken e Croke (2007) abordam a conectividade hidrológica e sedimentológica. O conceito de conectividade inclui conectividade lateral (largura do canal), conectividade longitudinal (transferência de material para o canal) e conectividade vertical (interações subsuperficiais e superficiais). A conectividade é frequentemente classificada como estrutural ou funcional, com a conectividade estrutural descrevendo o padrão espacial da paisagem e a conectividade funcional correlacionando o padrão espacial da paisagem com o processo de transferência na bacia hidrográfica (BRACKEN; CROKE, 2007; SOUZA; HOOKE, 2021; TURNBULL *et al.* 2008). Portanto, é possível vincular a conectividade do canal para a largura da paisagem ao transporte de sedimentos em encostas e à carga de fundo e à suspensão de sedimentos via fluxo fluvial.

A conectividade de sedimentos avalia como os fluxos de sedimentos se movem através de uma paisagem, conectando encostas e sistemas de drenagem. Consequentemente, o índice de conectividade (IC) representa a conexão entre várias partes de uma bacia hidrográfica (CAVALLI *et al.* 2013, CREMA; CAVALLI, 2008). Cislagui e Bischetti (2019), utilizando o conceito de conectividade em encostas montanhosas-florestais em áreas instáveis sob condições de deslizamento, relataram que a conectividade de sedimentos resulta de processos de erosão hídrica, resultando na redistribuição de sedimentos e, consequentemente, na formação da paisagem.

Por outro lado, o valor de CN do método SCS-CN para estimativa do escoamento superficial (JAIN; SINGH, 2019) foi desenvolvido como um índice que representa a combinação de um grupo hidrológico de solos e uma classe de uso do solo para estimar o escoamento potencial de uma bacia hidrográfica, representando o transporte lateral de água na paisagem. O valor da curva número é função dos seguintes fatores: grupo hidrológico de solos, uso da terra, complexo solo-cobertura e condições antecedentes de umidade. Portanto, essa abordagem resulta em parâmetros interessantes, pois o complexo solo-cobertura impede o movimento lateral da água em uma bacia hidrográfica.

Souza e Hooke (2021) investigaram os efeitos da variação sazonal da biomassa e da umidade antecedente do solo na conectividade hidrológica no semiárido brasileiro, e relataram descobertas que relacionam esses efeitos ao escoamento superficial e à erosão hídrica na escala da bacia hidrográfica. Esses autores também relataram que eventos de maior precipitação coincidiram com eventos de verão seco no semiárido brasileiro, quando as bacias hidrográficas semiáridas apresentaram conectividade hidrológica muito alta, indicando que a conectividade hidrológica está correlacionada com a alta variação sazonal da biomassa e a variabilidade da umidade antecedente. Além disso, Esses autores relataram que a conectividade hidrológica e sedimentológica está ligada à variabilidade semiárida na precipitação, vazão hídrica e densidade sazonal da vegetação quando a conectividade estrutural é representada pela cobertura sazonal do solo promovida pela vegetação e seu efeito na conectividade funcional na vazão hídrica dos ambientes semiáridos.

Esses achados, segundo Souza e Hooke (2021), concordam e reforçam os fatores de grupo hidrológico do solo, uso da terra, complexo solo-cobertura e condição antecedente de umidade do Número da Curva de Escoamento, especificamente o complexo solo-cobertura e as três condições antecedentes de umidade consideradas neste método.

A conexão entre fenômenos de transporte em encostas de bacias hidrográficas e taxas de transporte de sedimentos pode estar relacionada a questões como resistência ao fluxo lateral, impedância da superfície da água ao transporte lateral de sedimentos em encostas e fontes de carga de fundo e sedimentos em suspensão entregues ao sistema de drenagem. Esse sedimento transportado lateralmente pode ou não ter relação com a tensão de cisalhamento no canal principal. A conectividade da paisagem é funcional e inspira o manejo de recursos naturais, a degradação ambiental e a gestão ambiental.

Normalmente, a erodibilidade do solo é obtida para uma classe específica de solo, ou seja, a resistência natural à erosão hídrica (Wischmeier e Smith (1978), em fluxo hidráulico concentrado e não concentrado, quando este parâmetro do solo expressa a resistência natural à erosão do solo ou seu recíproco, que é a suscetibilidade natural aos processos de erosão do solo). No projeto de previsão de erosão hídrica, o modelo WEPP é baseado em processos físicos (ELLIOT et al. 1999, FLANAGAN; NEARING, 1995). Quando o escoamento superficial concentrado em canais gera uma tensão de cisalhamento que ultrapassa a tensão de cisalhamento crítica do solo, o que leva ao transporte de partículas do solo. Utilizando a regressão linear entre a tensão de cisalhamento aplicada e as taxas de desagregação do solo, é possível determinar a erodibilidade do solo e a tensão de cisalhamento crítica para cada classe de solo. Nessa modelagem, a tensão de cisalhamento crítica (τ_{cr}) é a interceptação linear com a abscissa de X, e a erodibilidade do solo é representada pelo coeficiente angular do ajuste de regressão entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa instantânea de desagregação do solo.

Portanto, determinar-se a erodibilidade de todos os solos em uma bacia hidrográfica é sempre desafiador, mas uma abordagem estatística pode ser usada para determinar a resistência natural do solo ao escoamento superficial. Essa abordagem estatística permite a erodibilidade de todos os solos da bacia hidrográfica, trabalhando em conjunto contra a tensão de cisalhamento do fluxo no rio, o que indica a erodibilidade da bacia hidrográfica. Essas relações entre o transporte de água e sedimentos em encostas agrícolas e parâmetros hidrológicos, como grupos hidrológicos de solos e curvas número, são utilizadas para determinar a conectividade lateral e determinar a resistência do solo natural a tensão de cisalhamento do fluxo. Isso significa que a erodibilidade da bacia hidrográfica, incluindo os efeitos de todos os solos da bacia, é uma ferramenta bem-vinda para a gestão ambiental sustentável, e pode ser adotada por agências governamentais que trabalham com recursos naturais, como solo, água, florestas e uso da terra, para a produção animal e agrícola, apoiando a hidrologia e a ciência do solo, simplificando as decisões governamentais sobre políticas ambientais.

Os objetivos deste estudo foram investigar a conectividade lateral do escoamento superficial e da descarga de sedimentos de três bacias hidrográficas brasileiras por meio de parâmetros hidrológicos, como grupos hidrológicos de solos e valores da curva número, com a cobertura do solo promovida por vegetação e culturas na forma de um complexo solo-vegetação, que gera impedância ao transporte de sedimentos em suspensão lateral, bem como ao transporte de areia em encostas que alcançam o sistema de drenagem e, finalmente, o canal primário da bacia hidrográfica. Outro objetivo é determinar a erodibilidade do solo na escala da bacia hidrográfica das três bacias hidrográficas brasileiras devido à possibilidade de adicionar o fluxo de sedimentos em suspensão das encostas à carga de fundo do canal principal e, ajustar todos os sedimentos dessas bacias hidrográficas à tensão de cisalhamento em seus respectivos rios por meio de regressão linear.

2. Metodologia

2.1 Bacias hidrográficas estudadas

Três bacias hidrográficas brasileiras foram selecionadas para esta pesquisa sobre transporte de sedimentos: a bacia semiárida Cachoeira (SILVA FILHO et al. 2019) com solos menos desenvolvidos e duas bacias hidrográficas costeiras brasileiras com solos mais desenvolvidos, a bacia do Beberibe (MORAES et al. 2024) e a bacia do Capibaribe (CANTALICE et al. 2015), para expressar o grau de resistência e desenvolvimento dos solos.

A bacia hidrográfica Cachoeira (Figura 1) possui uma área de 68,98 km² e um tempo de concentração de 4,22 horas; é uma pequena bacia hidrográfica localizada na cidade de Tabira, estado de Pernambuco, Brasil, a 7°32'12" de latitude sul e 37°29'18" de longitude oeste. A bacia hidrográfica Cachoeira apresenta um relevo com declives acentuados a suaves; seu canal principal apresenta declividade de 0,0041 m². O tipo climático é BSw_h, segundo a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 800 mm/ano e temperatura de 27 °C. A vegetação típica é a Caatinga arbórea e semiarbórea, conhecida no Brasil como Caatinga hiperxerófila, que cresce sob Neossolos Flúviais e Neossolos Líticos.

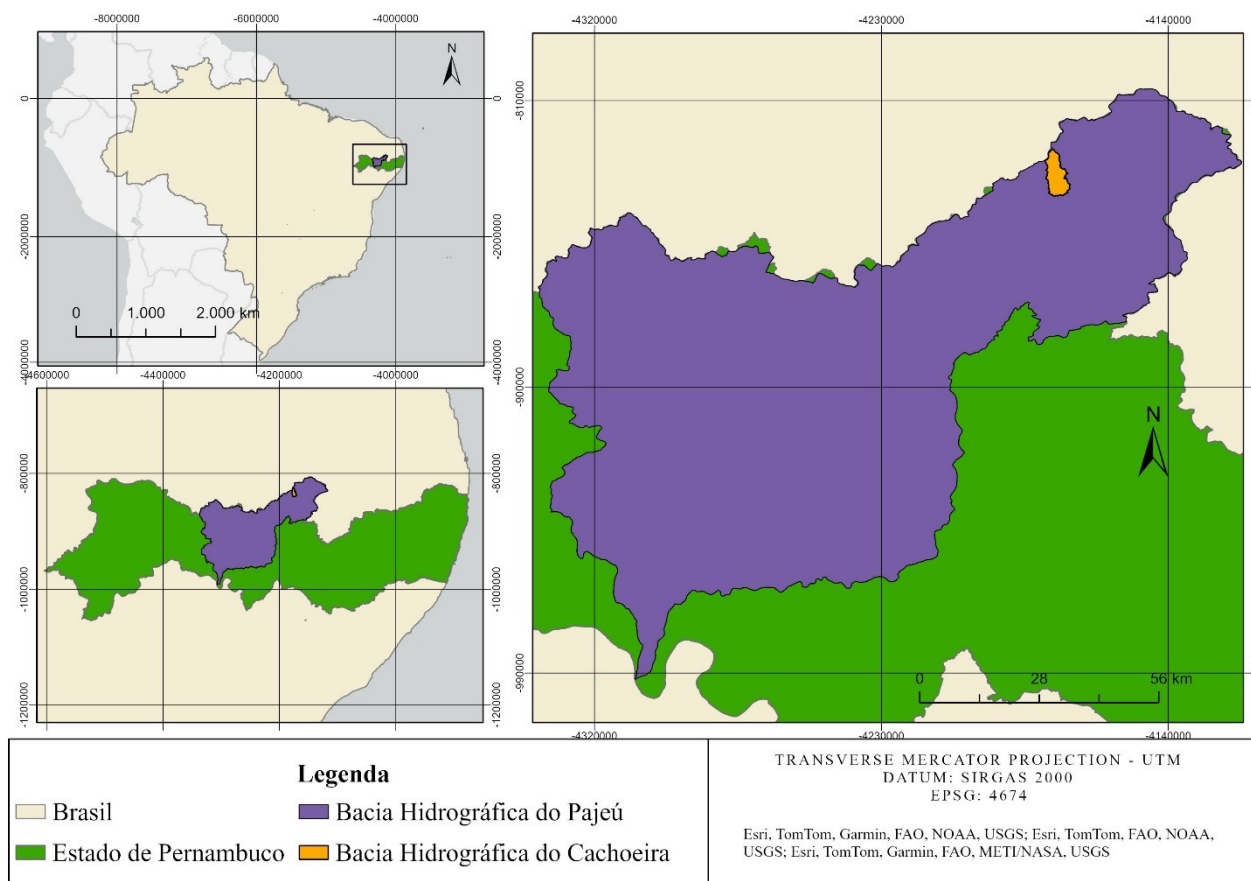


Figura 1. Mapa de localização da bacia do Cachoeira.

A bacia hidrográfica do Beberibe, na costa brasileira, apresenta precipitação pluvial abaixo de 1800 mm.ano^{-1} (Figura 2), conforme relatado por MORAES *et al.* (2024). Trata-se de uma pequena bacia hidrográfica, com área equivalente a 81 km^2 , com tempo de concentração de 10 horas, localizada na latitude $7^{\circ}40'56''$ e $8^{\circ}38'00''$ Oeste, e longitude $34^{\circ}49'00''$ e $35^{\circ}15'52''$ Oeste. Metade de sua área é urbana e a outra metade é Mata Atlântica, com relevo ondulado e declividade de canal de $0,00391 \text{ m.m}^{-1}$. Os solos são predominantemente Latossolos e Argissolos desenvolvidos (Figura 2).

A bacia do Capibaribe é uma grande bacia hidrográfica (Figura 3), com uma área de 7557 km^2 e 30 horas de tempo de concentração (CANTALICE *et al.* 2015), iniciando ainda na área semiárida e terminando no litoral leste, localizado na latitude $7^{\circ} 41''$ e $8^{\circ} 18''$ S e longitude $34^{\circ} 51''$ e 36° e $42''$ W. A região semiárida recebe 550 mm de chuva anualmente, enquanto o litoral leste recebe uma média de 1800 mm por ano. Na porção semiárida, a vegetação é arbórea e arbustiva semiarbórea; na parte litoral leste, há plantações de cana-de-açúcar. Os solos da bacia hidrográfica do Capibaribe incluem tipos menos desenvolvidos na região semiárida, como Cambissolos, Argissolos e Neossolos. Ao mesmo tempo, na parte costeira, há Argissolos e Latossolos, que são solos mais desenvolvidos devido a maiores chuvas. O relevo é ondulado na porção semiárida, enquanto a área costeira é suave. O canal principal tem uma declividade de $0,0079 \text{ m.m}^{-1}$.

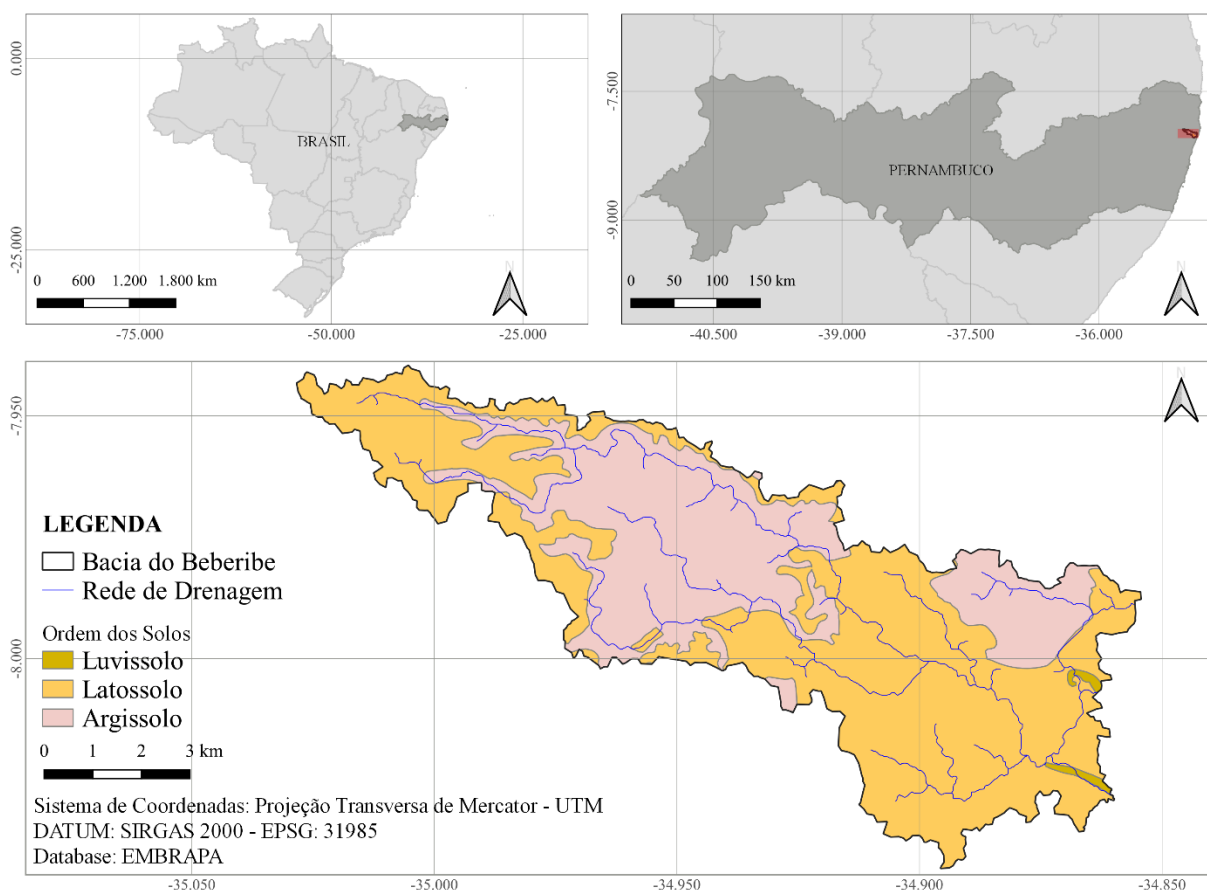


Figura 2. Mapa de localização e de solos da bacia do Beberibe.

Os grupos hidrológicos dos solos e valores da curva número (CN) do método SCS, conforme descrito em (Jain e Sing. 2019), foram considerados aqui. Este método calcula o escoamento potencial capturado em uma bacia hidrográfica da seguinte forma:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1)$$

onde Q = escoamento superficial (mm), P = precipitação total (mm), and I_a = a abstração inicial como $I_a = \lambda S$, em que λ = o coeficiente de abstração inicial assumido como 0,2, e S = a retenção potencial máxima de água pelos solos da bacia hidrográfica (mm) dada como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

onde o parâmetro CN expressa a interação entre o grupo hidrológico do solo e o uso da terra, ou seja, o complexo solo-cobertura, incluindo três parâmetros: uso do solo, práticas de uso e condições hidrológicas. O método da curva número do serviço de conservação do solo considera 15 usos diferentes para identificar os valores do número da curva. Em seguida,

o valor da curva número é considerado em três condições antecedentes de umidade do solo, representando as condições de vazão baixa, média e alta da bacia hidrográfica durante o ano (JAIN; SING, 2019).

As geobases de dados de todas as bacias hidrográficas foram imagens Aster e Landsat obtidas das instituições brasileiras de pesquisa IBGE, DNIT, MapBiomias e ZAPE-Embrapa.

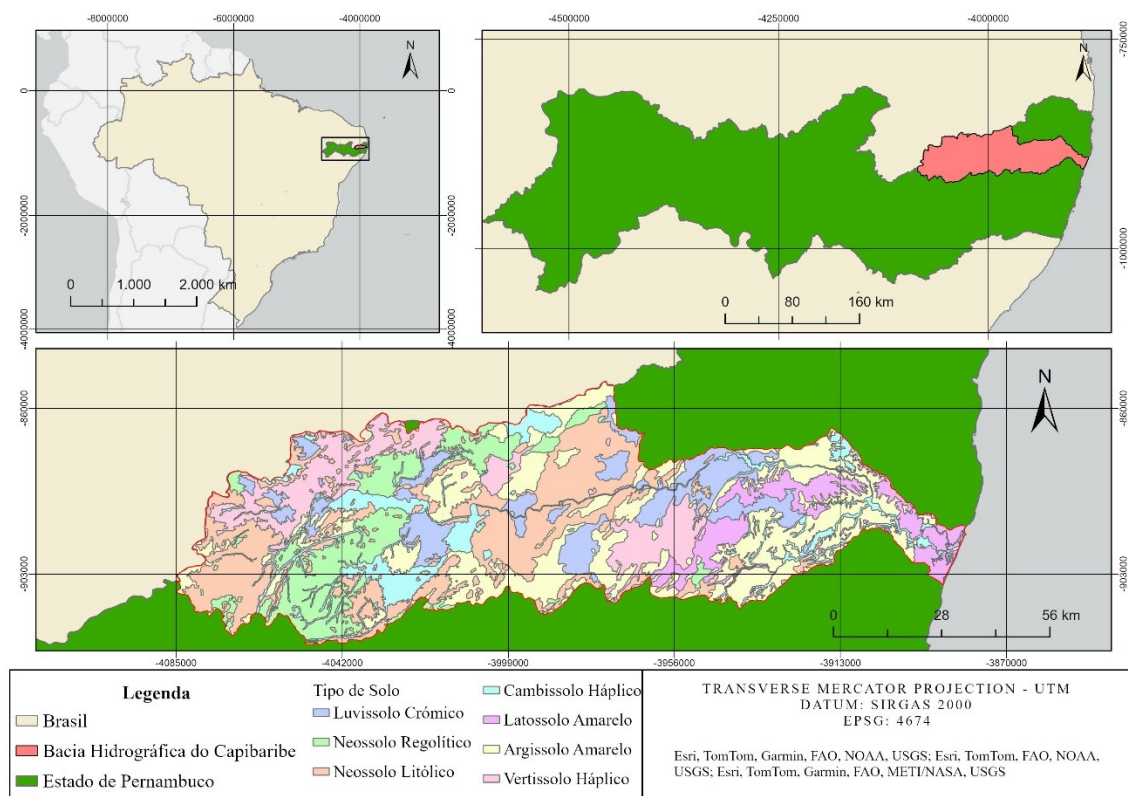


Figura 3. Mapa de localização e de solos da bacia do rio Capibaribe.

2.2. Determinações da descarga do sedimento suspenso e de sedimento de fundo

O sedimento em suspensão foi determinado seguindo o método de incremento de largura igual (EWI) de Edwards e Glisson (1978) e Gray (2015) quando as amostras de sedimento e os dados de descarga líquida foram coletados no canal principal das bacias hidrográficas estudadas. As seções transversais foram divididas em dez linhas verticais de largura igual quando o amostrador DH-48 ou DH-49 foi usado para coletar o sedimento em suspensão, de acordo com o nível de vazão. Um molinete fluviométrico eletromagnético foi usado para determinar a velocidade do fluxo em cada vertical. Seguindo Horowitz (2003), as taxas de sedimento suspenso foram calculadas para cada velocidade vertical de acordo com o produto da concentração de sedimento em suspensão (C_{ss}) obtida sob evaporação:

$$Q_{ss} = 0.0864 \sum (C_{ss_i} \cdot Q) \quad (3)$$

onde Q_{ss} é a taxa de sedimento em suspensão ($t \text{ dia}^{-1}$), 0,0864 é uma constante para ajuste de unidades, C_{ss} é a concentração de sedimento em suspensão no respectivo segmento vertical (mg L^{-1}) e Q é a descarga líquida de cada segmento vertical ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$); no entanto, aqui, os valores de Q_{ss} também foram expressos em $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

As taxas de carga de fundo foram obtidas apenas para as bacias hidrográficas de Beberibe e Capibaribe, seguindo Gray (2005) abaixo:

$$Q_{Bed} = \sum_i^n \frac{m}{w \cdot t} \quad (4)$$

em que Q_{bed} é a taxa de carga de fundo ($\text{g s}^{-1} \text{m}^{-1}$), m é a massa seca coletada e pesada da carga de fundo, w é a largura do bocal amostrador, 0,076 m, e t é o tempo de amostragem, que é igual a 60 s. Os valores do fluxo de sedimento de fundo também foram expressos em $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

3. Resultados e discussão

3.1. Conectividade Lateral – Taxas de sedimento suspenso em encostas e relações com a curva número

A Figura 4 apresenta os gráficos da concentração de sedimentos para as bacias hidrográficas do Capibaribe, Beberibe e Cachoeira durante os eventos de amostragem. O Rio Capibaribe apresenta um sedimentograma multimodal. Os primeiros eventos estão ligados à porção semiárida da bacia hidrográfica como picos em sequência e, após o sedimentograma, segue um pulso de onda que acompanha o comportamento do fluxo. Esse comportamento do pulso de onda provavelmente está correlacionado com rios sob represa, visto que a bacia hidrográfica do Capibaribe possui cinco barragens ao longo de seu eixo longitudinal. A concentração de sedimentos em suspensão varia de 360 mg.L^{-1} até o valor máximo de 1071 mg.L^{-1} . A bacia hidrográfica da Cachoeira apresentou sedimentogramas com padrão atrasado. Esse comportamento indica que a concentração de sedimentos em suspensão aumenta com o aumento do fluxo (Figura 4), o que geralmente não ocorre em bacias hidrográficas pequenas como a da Cachoeira (GUY, 1978). O Rio Cachoeira apresenta variação considerável nas concentrações de sedimentos em suspensão entre 31 e 1021 mg.L^{-1} , representando a variabilidade climática semiárida.

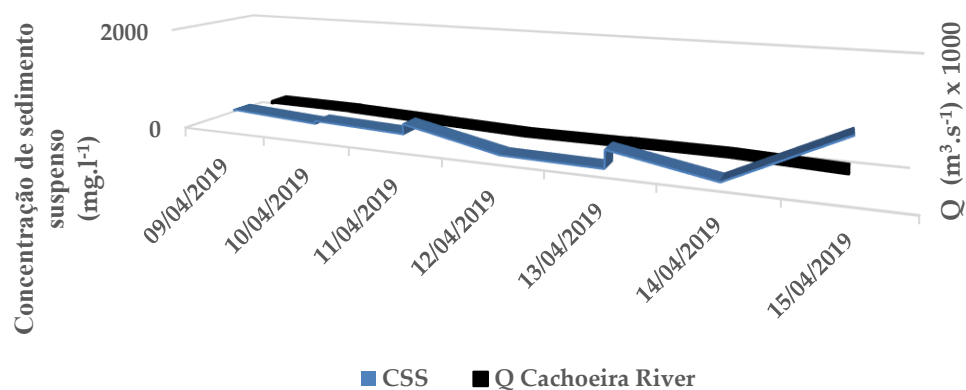
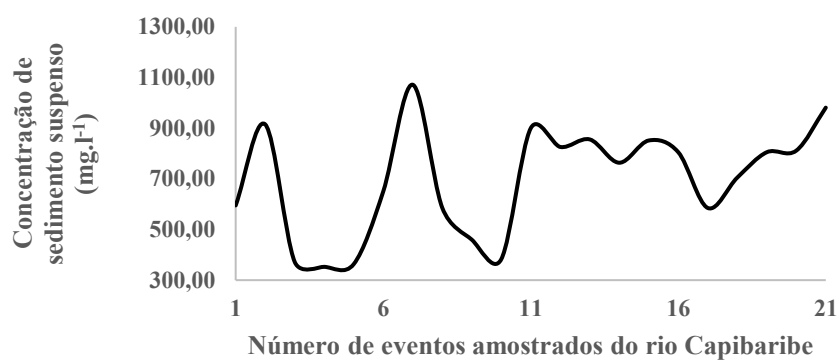
A Figura 4 ainda mostra que a concentração de sedimentos no Rio Beberibe acompanha de perto as variações de vazão, comuns em pequenas bacias hidrográficas (GUY, 1978), apesar do número reduzido de amostras. Todas as amostras foram coletadas na área florestada da bacia hidrográfica do Beberibe; portanto, não houve interferência humana. A concentração de sedimentos em suspensão no Rio Beberibe varia de 273 a 545 mg.L^{-1} . A Tabela 1 mostra as concentrações médias mensais de sedimentos em suspensão nas encostas da bacia hidrográfica do Capibaribe, coletadas em 21 campanhas de coletas de sedimento entre 2009 e 2011, e os valores de curva número (CN) atribuídos de acordo com as condições de chuva e vazão para esses anos. A Tabela 2 mostra todas as condições da bacia hidrográfica consideradas para atribuir os valores de CN para os três estudos de bacias hidrográficas brasileiras.

A Figura 5 mostra uma relação linear entre as concentrações médias mensais de sedimentos em suspensão para os meses atribuídos (Tabela 1), provenientes das 21 campanhas de medição de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, e os valores de curva número (CN) considerados. O sedimento em suspensão provinha das encostas do Capibaribe, onde foi desagregado e transportado para o canal principal da bacia hidrográfica. Essa relação mostra que os valores numéricos da curva foram capazes de representar o escoamento superficial lateral e o sedimento suspenso proveniente das encostas da bacia hidrográfica do Capibaribe.

A Figura 6 também mostra uma relação linear entre a concentração média mensal de sedimentos em suspensão e a curva número (CN) considerada para a bacia hidrográfica do Beberibe. Essa concentração média mensal de sedimentos em suspensão corresponde a 7 campanhas de medição de sedimentos em suspensão entre 2009 e 2010, de acordo com as três condições de fluxo do método da curva número (Tabela 2). Essa relação linear também demonstra que os valores numéricos da curva número podem expressar os fluxos laterais do escoamento superficial e de sedimento das encostas. Para a bacia hidrográfica de Cachoeira, todas as 12 campanhas de medição de sedimentos em suspensão foram realizadas em apenas um mês, porque foi impossível estabelecer uma relação entre a concentração de sedimento suspenso (SSC) e os valores da curva número.

Tabela 1. Concentração média mensal de sedimentos em suspensão da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe e valores do número da curva correspondentes às chuvas mensais e às condições de fluxo.

Months	CN	Css (mg.L ⁻¹)
Janeiro-Fevereiro	71	658
Mar-Maio	93	909
Junho - Agosto	83	643
Set.-Dezembro	83	846



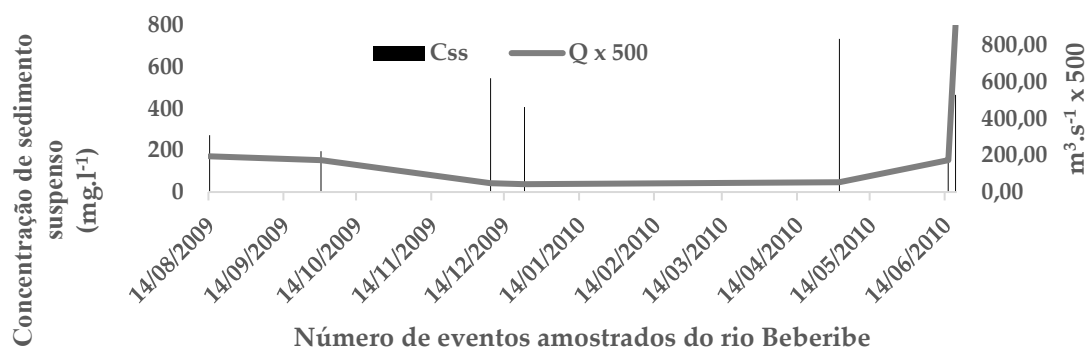


Figure 4. Comportamento do hidrograma e sedimentograma dos rios Capibaribe, Cachoeira e Beberibe.

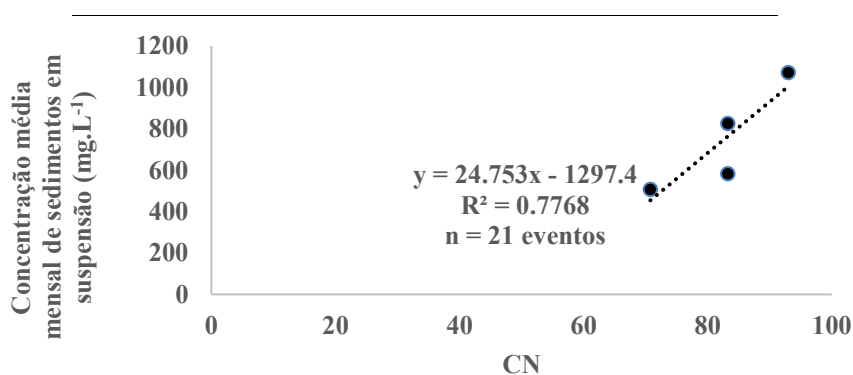


Figura 5. Relação linear entre a concentração média mensal de sedimentos em suspensão (mg/L) e os valores da curva número (CN) para a Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe.

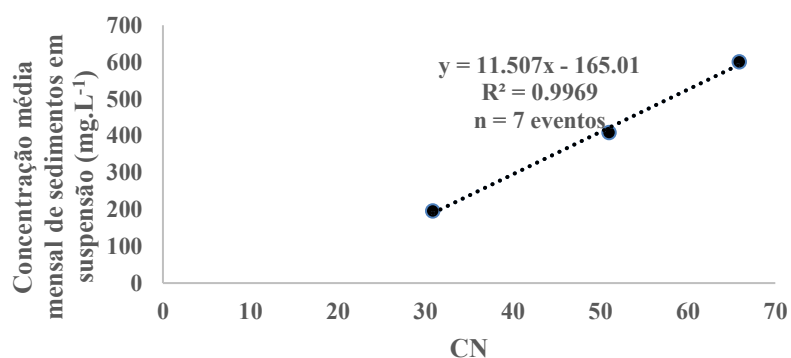


Figura 6. Relação linear entre a concentração média mensal de sedimentos em suspensão para os meses amostrados (mg.L⁻¹) e os valores da da curva número CN atribuídos para a Bacia Hidrográfica do Rio Beberibe.

Tabela 2. Solos, usos do solo, grupo hidrológico, e valores da curva número considerados para as três bacias hidrográficas brasileiras.

bacia hidrográfica do Capibaribe				
Solo	Uso do solo	grupo hidrológico	Condição da CN	
Argissolos	Cultivo da cana-de-açúcar	A	CNI =	70
Argissolos	Cultivo da cana-de-açúcar	B	CNII =	83
Luvissolos	Cultivo da cana-de-açúcar	C	CN III =	93
Neossolo lit., Cambissolo	Vegetação semi-arbustiva	C		
Luvissolos, Vertissolos	Caatinga semi-arbustiva	D		
bacia hidrográfica do Beberibe				
Solo	Uso do solo	grupo hidrológico	Condição da CN	
Argissolos e Latossolos	Mata	A	CNI =	31
Argissolos e Latossolos	Pasto	B	CNII =	51
Argissolos e Latossolos	Cultivo da cana-de-açúcar	B	CN III =	66
Solos de mangue	áreas de Mangue	C		
Latossolo	área urbana	C		
bacia hidrográfica do Cachoeira				
Solo	Uso do solo	grupo hidrológico	Condição da CN	
Neossolo litólico	Solo descoberto	D	CNI =	79
Neossolo fluvico	Culturas semiáridas/solo preparado	C	CNII =	81
Neossolo fluvico	Caatinga semi-arbustiva	C	CN III =	91
Neossolo litólico	Caatinga arbustiva	D		

Conforme demonstrado nas Figuras 5 e 6, as concentrações de sedimentos em suspensão dos rios Capibaribe e Beberibe apresentaram boa correlação com os respectivos valores da curva número, o que significa que o transporte lateral de sedimentos, constituído pelo sedimento em suspensão desagregado e transportado nas encostas, apresentou ajuste linear aos valores da curva número (CN). Essas relações são explicadas principalmente pelo complexo solo-cobertura, que, combinado com o grupo hidrológico dos solos, expressam impedância ou resistência ao movimento de água e sedimentos, condicionando os sedimentos e as vazões a jusante nas encostas. Portanto, conforme observado por MORAES et al. (2024), os valores da curva número expressam o fenômeno de transporte entre encostas na paisagem, representando a magnitude do movimento de sedimentos e água para o sistema de drenagem. Em três bacias hidrográficas brasileiras, os índices de conectividade e os valores de CN influenciaram o fluxo de sedimentos (MORAES et al., 2024). Os valores de CN representam o fluxo lateral e a conectividade de sedimentos entre encostas e o canal principal das três bacias hidrográficas brasileiras.

3.2. Relação entre carga de fundo, sedimento suspenso e tensão de cisalhamento no concentrado dos rios: erodibilidade do solo na escala da bacia hidrográfica

As Figuras 7, 9 e 11 mostram uma relação linear entre o sedimento suspenso proveniente das encostas das bacias hidrográficas brasileiras de Capibaribe, Beberibe e Cachoeira e sua tensão de cisalhamento correspondente (τ). Essas relações indicam que o sedimento em suspenso lateral mobilizado e transportado das encostas, e correlacionado com os valores da curva número já está correlacionado com a tensão de cisalhamento nos canais principais da bacia hidrográfica.

As Figuras 8 e 10 mostram uma forte correlação entre o fluxo de carga de fundo mais o fluxo de sedimento em suspensão e a tensão de cisalhamento (τ) nos rios Capibaribe e Beberibe. Essa relação é relevante tanto na escala da bacia hidrográfica quanto em escalas geomórficas menores, como sulcos ou ravinas, conforme observado por MORAES *et al.* (2024). Para a bacia hidrográfica de Capibaribe, o ajuste linear na Figura (7) indica uma tensão de cisalhamento crítica de 21,42 Pa e uma erodibilidade do solo de $0,2391 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Considerando a bacia hidrográfica do Rio Beberibe, a tensão crítica de cisalhamento (W_{tc}) da bacia hidrográfica foi de 88,4 Pa, e a erodibilidade do solo da bacia hidrográfica (K_w) foi de $9 \times 10^{-8} \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

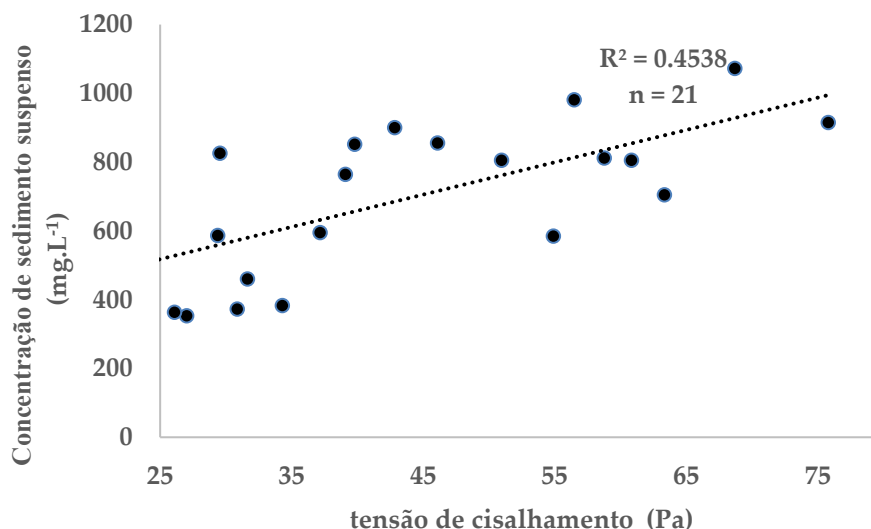


Figura 7. Relação linear entre a concentração média mensal de sedimentos em suspensão para os meses considerados (mg.L^{-1}) e a tensão de cisalhamento τ (Pa) do Rio Capibaribe.

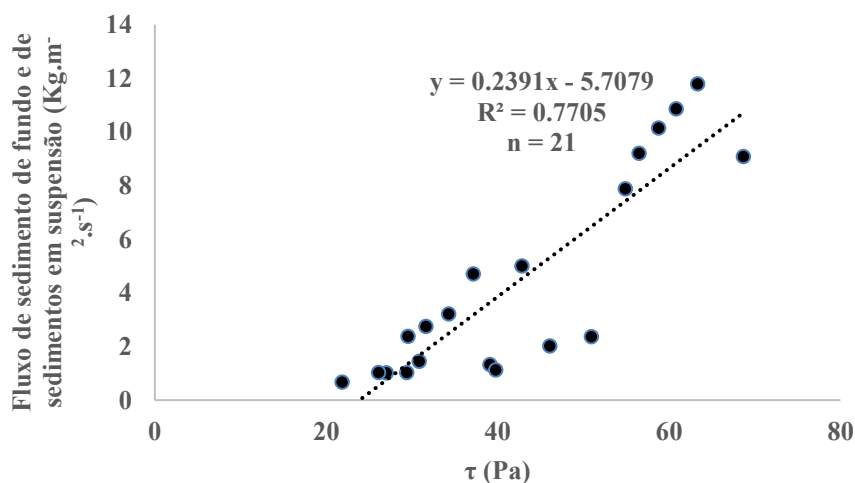


Figura 8. Relação linear entre o fluxo de sedimentos de fundo adicionado ao fluxo de sedimentos em suspensão e a tensão de cisalhamento no Rio Capibaribe, permitindo acessar a erodibilidade dos solos da bacia hidrográfica (K_w) e a tensão de cisalhamento crítica (W_{τ_c}).

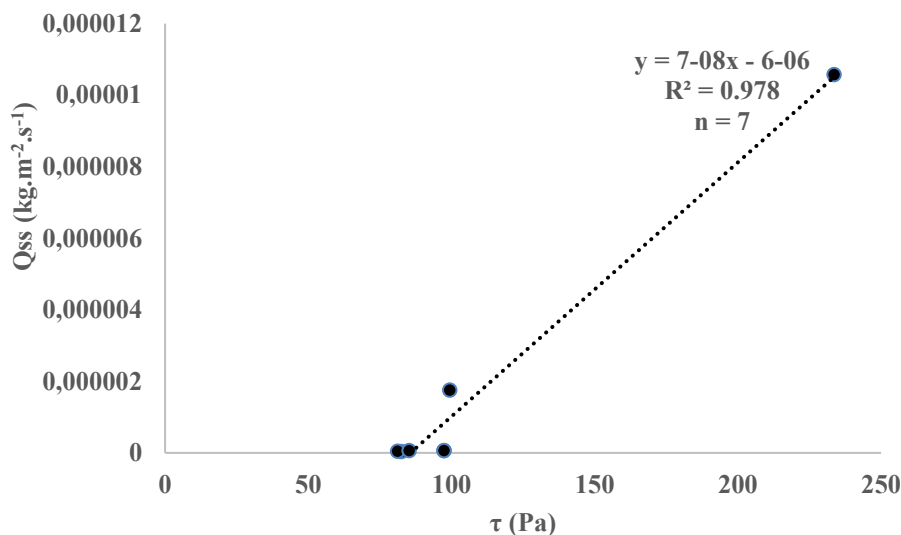


Figura 9. Relação linear entre o fluxo de sedimentos suspenso e a tensão de cisalhamento no canal principal da bacia hidrográfica do Beberibe, considerando seis amostras de sedimentos em suspensão coletadas entre 2009 e 2010.

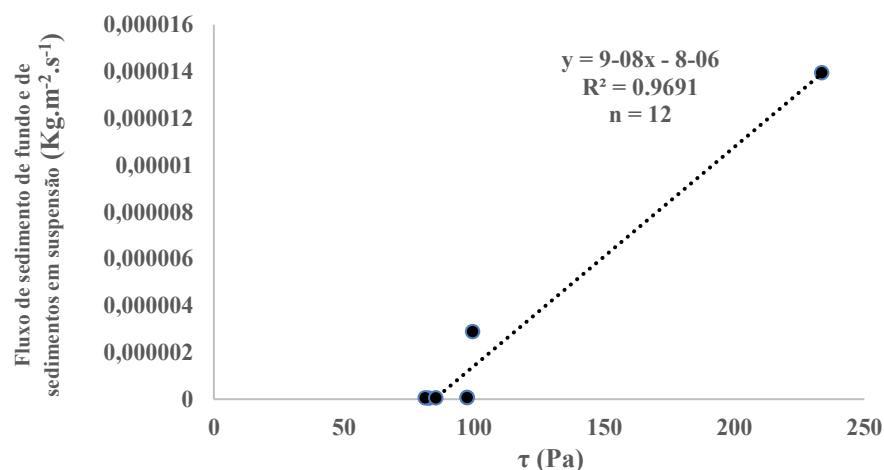


Figura 10. Relação linear entre a carga de fundo e o fluxo de sedimento suspenso do Rio Beberibe considerando apenas as amostras entre 2009 e 2010 e a tensão de cisalhamento no canal principal, permitindo determinar a erodibilidade do solo da bacia hidrográfica (K_w) e tensão crítica de cisalhamento (W_{tc}).

Essa relação já foi obtida para a bacia hidrográfica do Rio Cachoeira (Figura 11); no entanto, não há amostragem de carga de fundo que considere apenas o fluxo de sedimentos em suspensão e a tensão de cisalhamento (τ). Além disso, o fluxo de sedimentos em suspensão apresentou um ajuste linear, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,79. Essa regressão linear foi permitida pela interceptação com o eixo X, que produziu uma tensão de cisalhamento crítica (W_{tc}) da bacia hidrográfica de 7,84 Pa. Devido à falta de dados de carga de fundo, foi impossível obter a erodibilidade do solo (K_w) para a bacia hidrográfica do Rio Cachoeira.

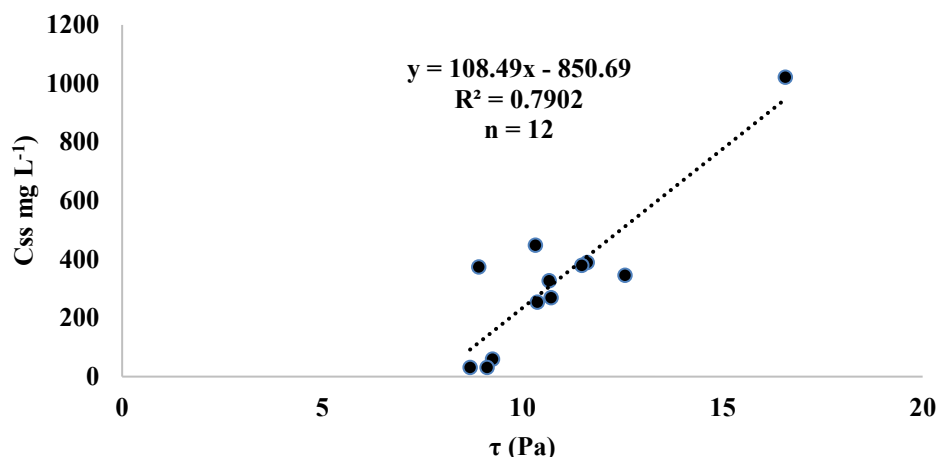


Figura 11. Relação linear entre o fluxo de sedimento suspenso do Rio Cachoeira considerando onze amostragens entre 2009 e 2010, e a tensão de cisalhamento no canal principal, permitindo determinar a erodibilidade dos solos da bacia hidrográfica (K_w) e a tensão crítica de cisalhamento ($W\tau_c$).

A relação linear entre as taxas de sedimento desagregado e a tensão de cisalhamento é geralmente aplicada para encontrar a erodibilidade do solo em pequenas feições geomórficas de erosão, como sulcos e ravinas (CANTALICE *et al.* 2005, ZHANG *et al.* 2014, PARIHIZHAR *et al.* 2021, LIU *et al.* 2022, YAMAGUCHI *et al.* 2022, YUAN *et al.* 2022) e em canais coesos (JAIN *et al.* 2021, GAO *et al.* 2021, PARTHENIADES, 1965), no entanto, aqui também foi aplicada com sucesso para determinar-se a erodibilidade do solo na escala da bacia hidrográfica, o que significa que todos os efeitos do solo de uma bacia hidrográfica são quantificados porque todo o sedimento vem de encostas, é conectado pelo valor CN, e é adicionado à carga de fundo no rio para determinar o efeito conjunto de todos os solos da bacia hidrográfica. Além disso, o complexo solo-cobertura e o grupo hidrológico de solos são cruciais para resumir todas as interações entre solo, fluxo e vegetação em estudos de bacias hidrográficas.

A grande bacia hidrográfica do Capibaribe apresenta uma tensão crítica de cisalhamento (T_{cr}) de 21,42 Pa e uma erodibilidade do solo na escala da bacia hidrográfica (K_w) de $0,2391 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Esses valores fazem sentido porque a bacia hidrográfica do Capibaribe possui sete tipos de solo: os dois mais desenvolvidos, Latossolos e Argissolos, na parte costeira, e os solos menos desenvolvidos, como Cambissolos, Neossolos e Luvisolos, na parte dentro da região semiárida do Brasil.

A bacia hidrográfica do Cachoeira, que está inteiramente em um ambiente semiárido, apresenta solos menos desenvolvidos, como Neossolos Líticos e Neossolos Flúvicos, entre os estudos de bacias hidrográficas e produziu um valor de tensão crítica de cisalhamento (T_{cr}) menor, igual a 7,84 Pa.

A bacia hidrográfica do Rio Beberibe estando na a costa brasileira; portanto, em um ambiente que gera solos desenvolvidos, com a tensão crítica de cisalhamento da bacia hidrográfica ($W\tau_c$) e a erodibilidade do solo na escala da bacia hidrográfica (K_w), maiores do que as de todas as outras bacias hidrográficas avaliadas aqui, com 88,4 Pa de tensão crítica de cisalhamento da bacia hidrográfica ($W\tau_c$) e K_w igual a $9 \times 10^{-8} \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Esses dados estão de acordo com os relatados por MORAES *et al.* (2024) para a mesma bacia hidrográfica com base em um conjunto de dados mais extenso, com uma tensão de cisalhamento crítica da bacia hidrográfica de 87,5 Pa e uma erodibilidade do solo da bacia hidrográfica de $7,93 \times 10^{-8} \text{ (kg N}^{-1} \text{ s}^{-1})$.

4. Considerações finais

As concentrações de sedimentos suspenso apresentaram boa correlação com os respectivos valores da curva número, o que significa que o transporte lateral de sedimentos, constituído por sedimentos em suspensão desprendidos e transportados nas encostas, apresentou um ajuste linear aos valores da curva número CN. As relações lineares são atribuídas principalmente ao complexo solo-cobertura, que, juntamente com o grupo hidrológico do solo, indica impedância ou resistência ao movimento de água e sedimentos, afetando os sedimentos e as vazões a jusante nas encostas.

Os sedimentos em suspensão das encostas das bacias hidrográficas brasileiras de Capibaribe, Beberibe e Cachoeira também apresentaram boa correlação com suas tensões de cisalhamento correspondentes (τ), o que indica que o mesmo sedimento em suspensão lateral, mobilizado e transportado das encostas e correlacionado aos valores da curva número, já está correlacionado às tensões de cisalhamento nos canais principais da bacia hidrográfica.

A relação linear entre taxas de transporte total e tensão de cisalhamento foi aplicada aqui com sucesso para alcançar a erodibilidade do solo na escala da bacia hidrográfica, o que significa que todo o efeito do solo de uma bacia hidrográfica foi quantificado devido a todo o sedimento vindo das encostas, conectado pelo valor da curva número CN, e adicionado à carga de fundo no rio, permitiu conhecer o efeito conjunto de todos os solos da bacia hidrográfica. Portanto, foi demonstrado que o fluxo carregado de sedimentos no sistema fluvial de três bacias hidrográficas brasileiras recebeu sedimentos em suspensão originários de encostas por meio de conectividade lateral, conforme quantificado pelos valores da curva número. A carga total, constituída pela carga de fundo e sedimentos em suspensão entregues no sistema fluvial das três bacias hidrográficas brasileiras, foi muito bem correlacionada para todos os solos, permitindo abordar a erodibilidade do solo na escala da bacia hidrográfica, uma importante demanda ambiental dos tomadores de decisão.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela CAPES, Brasil (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior) e FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco).

5. Referências

- 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. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6313>.
- CANTALICE, J. R. B.; CASSOL, E. A.; REICHERT, J. M.; BORGES, A. L. D. Flow hydraulics and sediment transport in rills of sandy clay loam soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 4, p. 597-607, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000400012>.
- CANTALICE, J. R. B. et al. Bedload and suspended sediment of a watershed impacted by dams. In: HRISSANTHOU, V. (ed.). *Effects of Sediment Transport on Hydraulic Structures*. London: Intech, 2015. p. 19-40. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61478>.
- CAVALLI, M. et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, v. 188, p. 31-41, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>.
- CISLAGUI, A.; BISCHETTI, G. B. Source areas, connectivity, and delivery rate of sediments in mountainous-forested hillslopes: A probabilistic approach. *Science of the Total Environment*, v. 652, p. 1168-1186, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.318>.
- CREMA, S.; CAVALLI, M. SedInConnect: a stand-alone, free, open-source tool for assessing sediment connectivity. *Computers & Geosciences*, v. 111, p. 39-45, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.009>.
- EDWARDS, T. K., GLISSON, G. D. 1999. *Field methods for measurement of fluvial sediment*. Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey (USGS). Reston, Virginia, 1999, 97 p.

- ELLIOT, W. J. et al. *A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88*. West Lafayette: USDA, National Soil Erosion Research Laboratory, 1999. Flanagan, D.C. and Nearing, M.A. 1995. "Erosion Prediction Project, Hillslope Profile and Watershed Model Documentation". *United States Department of Agriculture*, USA, 1995.
- FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. *Erosion Prediction Project, Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. USA: United States Department of Agriculture, 1995.
- GAO, X. et al. Experimental study on critical shear stress of cohesive soils and soil mixtures. *Transactions of the ASABE*, v. 64, n. 2, p. 587-600, 2021. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.14065>.
- GUY, H. P. Fluvial sediment concepts. In: *Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey*. Washington: USGS, 1978. Book 3, TWRI 3-C1, p. 1-55.
- GRAY, J. R. *Sediment data collection techniques*. US Geological Survey Training Course. Washington: USGS, 2005.
- HOROWITZ, A. J. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, v. 17, p. 3387-3409, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.1299>.
- JAIN, R. et al. Influence of cohesion on scour at piers founded in clay-sand-gravel mixtures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 147, n. 10, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001616](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001616).
- JAIN, S. K.; SINGH, V. P. *Engineering Hydrology: An introduction to processes, analysis and modelling*. New York: McGraw-Hill Education, 2019. 598 p.
- LIU, D. et al. Determination of rill erodibility and critical shear stress of saturated purple soil slopes. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 10, p. 38-45, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.04.013>.
- MORAES, J. F. S. et al. Lateral sediment connectivity by curve number and a proposed approach to soil erodibility at the watershed scale. *Catena*, v. 234, 2024. p. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107611>.
- PARIHIZKAR, M. et al. Variability of rill detachment capacity with sediment size, water depth and soil slope in forest soils: A flume experiment. *Journal of Hydrology*, v. 601, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126625>.
- PARTHENIADES, E. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Division*, v. 91, p. 105-138, 1965. DOI: <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001165>.
- SILVA FILHO, J. A. et al. Drag coefficient and hydraulic roughness generated by an aquatic vegetation patch in a semiarid alluvial channel. *Ecological Engineering*, v. 141, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105598>.
- SOUZA, J.; HOOKE, J. Influence on seasonal vegetation dynamics on hydrological connectivity in tropical drylands. *Hydrological Processes*, p. 1-19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.14427>.

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. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.4>.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1978. 58 p. (Agriculture Handbook, 537).

YAMAGUCHI, A. et al. Relationship between soil erodibility by concentrated flow and shear strength of a Haplic Acrisol with a cationic polyelectrolyte. *Catena*, v. 217, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106506>.

YUAN, X. et al. Temporal variation in rill erodibility for two types of grasslands. *Scientific Reports*, v. 12, n. 9736, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13307>.

ZHANG, T. et al. Temporal variation in rill erodibility for two types of grasslands. *Soil Research*, v. 52, n. 8, p. 781-788, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR14076>.