

ANÁLISE MULTITEMPORAL E CARACTERIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE EROÇÃO DE MARGENS NO BAIXO CURSO DO RIO JAGUARIBE – CEARÁ – BRASIL

José Hamilton Ribeiro Andrade

Universidade Estadual do Ceará, Programa de Pós-graduação em Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
hamilton.meioambiente@yahoo.com.br

Andrea Almeida Cavalcante

Universidade Estadual do Ceará, Programa de Pós-graduação em Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
andreauece@gmail.com

Oscar Vicente Quinonez Fernandez

Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Programa de Pós-graduação em Geografia, Marechal Cândido Rondon, PR, Brasil
oscar.fernandez@unioeste.br

RESUMO

Este trabalho analisou o processo de erosão marginal do rio Jaguaribe no período de 2015 - 2023, em um trecho de aproximadamente 10 km, situado a jusante do Açude Castanhão no seu baixo curso, precisamente no município de Quixeré/CE. Para isso foram escolhidas nove seções para monitoramento, essas foram divididas em três grupos: Área Conservada (AC), Área Parcialmente Conservada (APC) e Área Degradada (AD). Para o monitoramento foi utilizada a metodologia dos pinos de erosão. O grupo de Área Degradada foi o que apresentou maior volume de material erodido, diferente das Áreas Conservadas que apresentaram os menores valores de recuos e volume erodido. Para o período avaliado a principal condicionante erosiva foram as precipitações. Os principais processos erosivos observados nas margens estudadas foram: corrosão fluvial e pluvial, desmoronamento por cisalhamento, e erosão de subsuperfície (*piping*).

Palavras-chave: Semiárido. Recuo de margens. Método dos pinos.

MULTITEMPORAL ANALYSIS AND CHARACTERIZATION OF BANK EROSION PROCESSES IN THE LOWER COURSE OF THE JAGUARIBE RIVER – CEARÁ STATE – BRAZIL

ABSTRACT

This study analyzed the bank erosion process of the Jaguaribe River from 2015 to 2023, in a trench of approximately 10 km, located downstream of the Castanhão Reservoir in its lower course, precisely in the municipality of Quixeré, Ceara state, Brazil. For this purpose, nine erosion stations were chosen for monitoring, which were divided into three groups: Conserved Area (AC), Partially Conserved Area (APC) and Degraded Area (AD). The erosion pin methodology was used for monitoring. The Degraded Area group presented the largest volume of eroded material, while the Conserved Areas presented the lowest values of erosion rates and eroded volume. For the period evaluated, the main erosive conditioning factor was precipitation. The following erosion processes were observed in the studied sections: fluvial and pluvial erosion, shear collapse, and subsurface erosion (*piping*).

Keywords: Semiarid. Bank retreat. Erosion pins.

INTRODUÇÃO

A fragilidade dos ambientes naturais, diante das intervenções da sociedade é maior ou menor em função de suas características intrínsecas. Atualmente são poucos os espaços naturais que não sofreram alterações no seu equilíbrio dinâmico, aqueles que passaram a receber intensivamente as atividades humanas, apresentam-se extremamente modificados e muitas vezes ocasionam problemas para as sociedades (Ross, 2006).

Os ambientes fluviais proporcionaram ao longo da história humana o nascimento e desenvolvimento de várias civilizações, uma vez que exibem um papel importante na realização das diferentes atividades humanas, principalmente aquelas consideradas essenciais como, a produção de alimentos, abastecimento de água, geração de energia e outras (Suguio; Bigarella, 1990; Costa, 2009; Tundisi; Matsumura-Tundisi, 2011). Em decorrência da sua importância, esses espaços são objeto de várias pesquisas científicas, sendo a geomorfologia fluvial o ramo dentro da ciência geomorfológica a responsável por seu entendimento (Cunha, 2008; Cavalcante, 2018).

Desse modo, a geomorfologia fluvial permite a especialistas de diferentes áreas do saber, o entendimento da estruturação espacial dos cursos d'água e redes hidrográficas, como também a dinâmica espaço-temporal, a fim de compreender as alterações nos fluxos de matéria e energia no sistema fluvial, que são os sistemas ambientais mais alterados pelas atividades socioeconômicas (Stevaux; Latrubesse, 2017; Barros; Magalhães Júnior, 2020).

Entre as diferentes formas de interferência antrópica na dinâmica natural ao longo do tempo nos ambientes fluviais, a construção de barramentos de cursos d'água está entre as mais significativas no que se refere às mudanças no fluxo de matéria e energia dos canais fluviais (Coelho, 2008; Santos; Souza, 2020; Guo *et al.*, 2020). Essas alterações no canal fluvial são, na maioria das vezes, fenômenos localizados que proporcionam efeitos em cadeia, com mudanças muitas vezes irreversíveis, quebrando a capacidade de resiliência do sistema (Cunha, 2013).

O ajuste e acomodação do canal fluvial a jusante de barragens incluem várias alterações, como aquelas relacionadas ao fluxo de água e o fluxo de sedimentos. Essas podem ocasionar mudanças nos processos morfológicos do canal após a barragem, representadas pela erosão do leito e das margens do rio, e por aggradação do canal fluvial, realizado pela deposição de material no leito, ou mudanças em sua forma e em seu padrão (Brandt, 2000; Coelho, 2008; Siqueira *et al.* 2013; Best, 2019; Lyu *et al.*, 2020).

A erosão marginal ou erosão de margens de um rio, é o fenômeno natural que mais dinamiza as paisagens fluviais, sendo passível de ser acelerado pelas atividades humanas, podendo gerar problemas de ordem social, ambiental e econômica (Hooke, 1980; Fernandez, 1990; Kumm *et al.*, 2008; Magalhães, 2010; Zaimes; Shultz, 2015; Rahman; Gain, 2020). Esse processo é resultante da relação dos atributos hidrodinâmicos associados às características da margem, envolvendo aspectos físicos e morfométricos dos taludes (barrancos), sendo intensificado pelo uso e ocupação das margens do canal fluvial (Gazolla; Gonçalves, 2017).

Conforme Charlton (2008), a erosão marginal ocorre em decorrência de vários processos diferentes que podem ser agrupados em três grupos: processo pré-enfraquecimento das margens, com ciclos repetidos de umedecimento e secagem da margem fluvial, preparando o talude da margem para erosão; processos fluviais, no qual as partículas individuais e agregadas das margens são removidos por arrastamento direto; e os processos de movimento de massa, que incluem o colapso, queda de blocos e deslizamento.

O comportamento dos processos de erosão marginal pode ser relacionado ao tipo climático no qual está inserida a bacia hidrográfica. Nos rios situados em regiões semiáridas, que apresentam precipitações irregulares e fluxo sazonal, os processos erosivos são observados com maior magnitude no período chuvoso, pois favorece a ocorrência de fluxo no canal. Nos rios situados em regiões úmidas, as vazões fluviais e as precipitações são mais regulares ao longo do ano, fazendo com que a erosão das margens desses canais ocorra com mais frequência ao longo do ano (Andrade; Maia, 2020).

Nesse contexto, destacamos o rio Jaguaribe, situado na porção semiárida do Nordeste brasileiro no estado do Ceará, esse rio apresenta muitos açudes ao longo da sua bacia, que contribuem para alterar sua dinâmica natural. Dessa forma, esse trabalho objetiva avaliar o recuo das margens do rio Jaguaribe no seu baixo curso, assim como caracterizar os processos erosivos atuantes nas margens no período de 2015 a 2023.

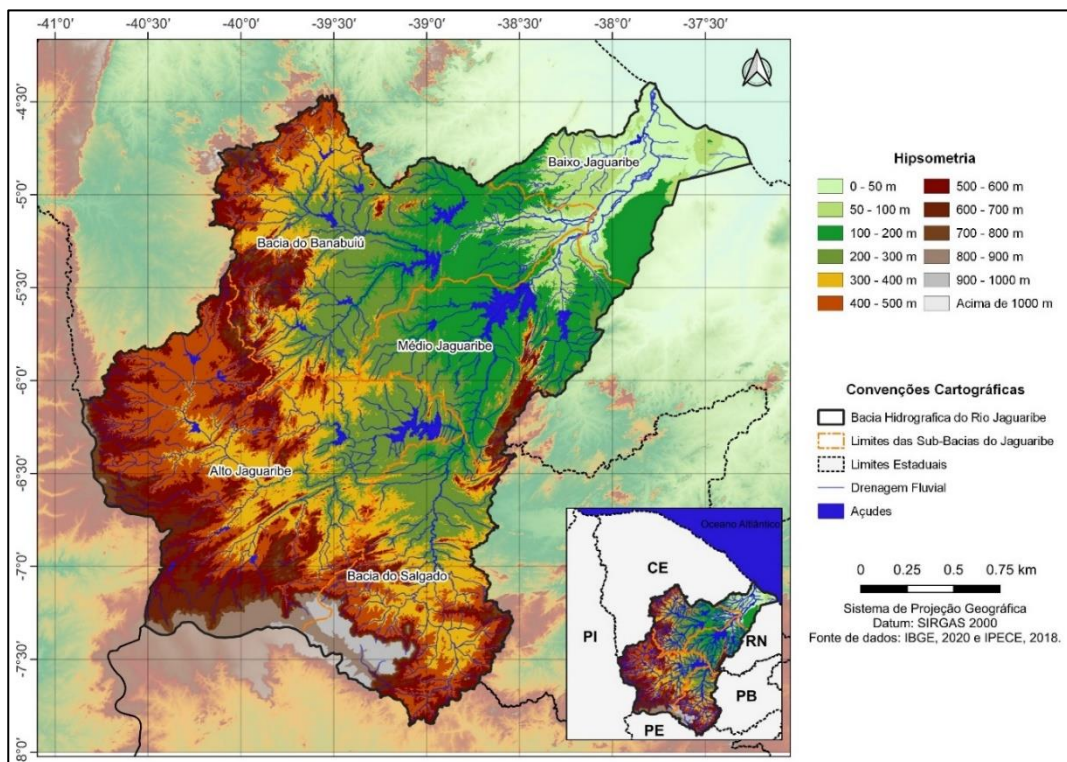
METODOLOGIA

Área de estudo

As características da hidrologia regional do Nordeste seco são particulares e influenciadas totalmente pelo ritmo climático sazonal, que predomina no espaço fisiográficos dos sertões. Os rios intermitentes do Nordeste diferentemente dos rios das áreas mais úmidas do território brasileiro, no período de estiagem secam desde suas cabeceiras até próximo o litoral. Esses rios apresentam alta variabilidade de descarga influenciada pela dinâmica das chuvas, em geral concentradas e mal distribuídas (Ab'Sáber, 2003).

Neste contexto, destacamos o rio Jaguaribe, um dos mais importantes do Estado do Ceará, com extensão de mais de 600 km, desde sua nascente no Morro da Lagoa Seca, na Serra das Pipocas, nos limites entre os municípios de Tauá, Pedra Branca e Independência, até sua desembocadura no Oceano Atlântico entre os limites dos municípios de Aracati e Fortim (Castro *et al.*, 2020). A bacia hidrográfica em questão, ocupa quase 50% do território cearense, sendo dividida em cinco Sub-bacias: Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Bacia do Banabuiú e Bacia do Salgado (Figura 1).

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do rio Jaguaribe no Estado do Ceará



Fontes: IBGE, 2020; IPECE, 2018. Organização: os autores, 2024.

Por apresentar afluentes e calha principal sem água por longo período, e devido à sua grande extensão, o rio Jaguaribe foi considerado o maior rio seco do mundo. Atualmente, em função da forte regularização da vazão desempenhada pelos açudes, o canal principal passou a ser visto como perenizado. Apesar dessa condição, ainda existe grande número de afluentes que permanecem secos por vários meses, apresentando fluxo apenas no período chuvoso (Castro *et al.*, 2020).

O rio Jaguaribe no seu alto curso apresenta baixa sinuosidade (1,2), com larguras de margens plenas que podem variar de 60-180 m e profundidade que pode alcançar 3 m. No seu médio e baixo curso, sua sinuosidade varia de 1,2 para montante a 1,5 nas intermediações da sua foz. Já a largura das margens plenas do canal varia entre 150-400 m. No alto curso o rio Jaguaribe apresenta padrão de canal semelhante a canal reto ou pouco sinuoso, decorrente da influência direta das condições geológicas. No seu médio e baixo curso o canal apresenta padrão composto, variando de *wandering* e entrelaçado entre períodos de estiagem e chuva, respectivamente. Numa escala mais ampla, dois trechos do rio poderiam assumir um padrão *anabranching*, onde o canal se divide, formando dois grandes canais com comportamentos diferentes (Cavalcante, 2018).

Não fugindo da realidade de boa parte dos rios semiáridos do Nordeste brasileiro, o rio Jaguaribe apresenta trechos perenizados a partir da construção de açudes. A exemplo disso, destacamos o açude Castanhão (Açude Público Padre Cicero), construído em 2002, situado no município de Alto Santo na Sub-bacia do Médio Jaguaribe e distante aproximadamente 183 km da sua foz, com uma área de bacia de 20.070 km² e um volume de acumulação de 6,7 bilhões de m³ (COGERH, 2023).

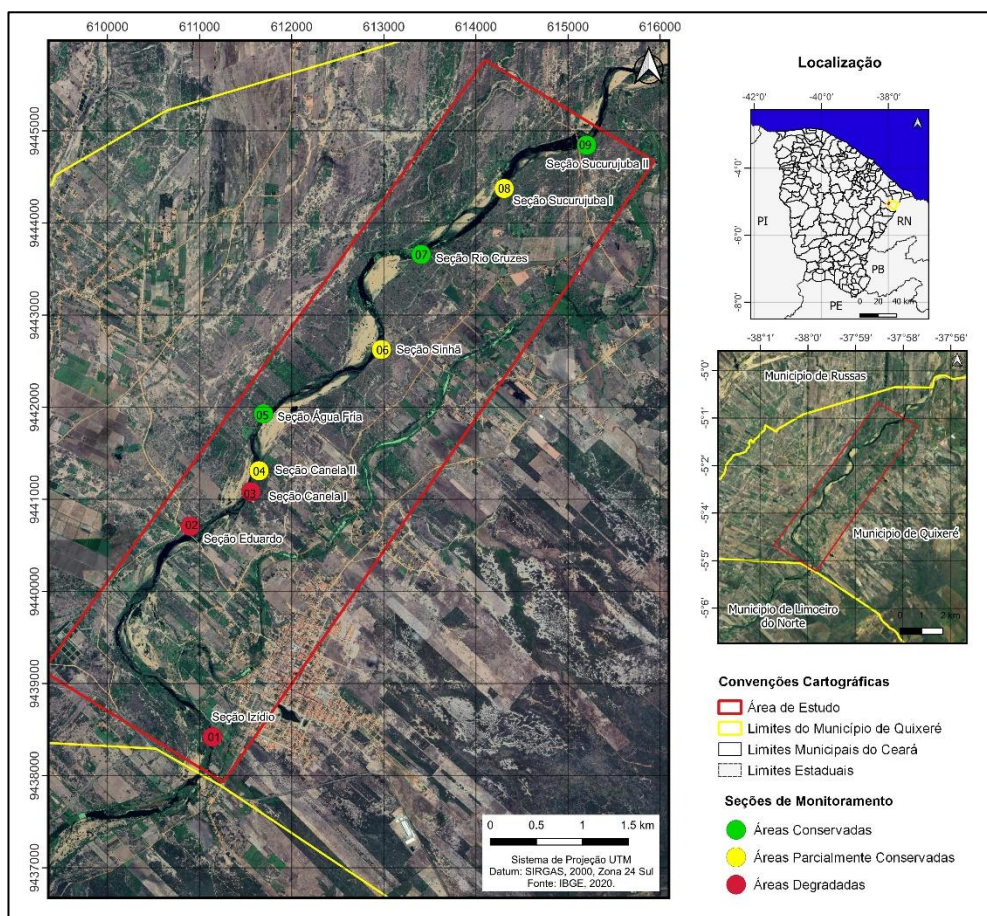
A jusante do açude Castanhão, outras formas de barramentos são observadas ao longo do rio Jaguaribe, denominados de passagens molhadas. Conforme Bezerra (2010), as passagens molhadas são

estruturas de concreto, construídas transversalmente a pequenos rios ou riachos, sendo que algumas permitem o escoamento da água por cima durante todo o ano, formando uma pequena lâmina d'água, e outras apenas em períodos de cheias dos rios. Essas estruturas possibilitam o fluxo de pessoas e mercadorias entre o município e suas comunidades rurais.

Com a construção do açude Castanhão, a vazão do rio Jaguaribe, ficou regularizada com média aproximadamente de 10 m³/s, no período seco do ano (sem chuvas), e em 5 m³/s no período chuvoso. Esse reservatório acaba sendo responsável por reter cerca de 97% do volume de materiais particulados em suspensão durante os períodos de chuva, retendo em média 17,4 t de material, sendo parte desse material (cerca de 6%) liberada para o estuário durante os períodos de seca (Grossi Hijo, 2009; Cavalcante, 2012).

Nesse contexto, a pesquisa apresenta como recorte espacial de análise um trecho de 10 km do rio Jaguaribe à jusante do açude Castanhão, situado na Sub-bacia do Baixo Jaguaribe, no município de Quixeré, contando a partir da passagem molhada de Quixeré (Latitude 5°5'3.88"S Longitude 37°59'57.14"O) localizada na comunidade de Lagoa do Boi, até a passagem molhada de Sucurujuba (Latitude 5°1'16.98"S Longitude 37°57'40.62"O) na zona rural do município em questão (Figura 2).

Figura 2 - Localização da área de estudo na bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe no município de Quixeré/CE



Fonte: IBGE, 2020. Organizado pelos autores, 2024.

Este trecho do rio Jaguaribe apresenta extensa planície aluvial, resultante do alargamento do vale à jusante, com declividade média de 0,029%, e com desnível total de 40 m em relação ao nível do mar (CEARÁ, 2009). A compartimentação geomorfológica é submetida às influências de processos morfogenéticos controlados pelo clima semiárido caracterizado pela acentuada irregularidade das chuvas no tempo e no espaço (Souza et al., 2006). No trecho em estudo a normal climatológica é

690,10 mm/ano, apresentando como principal sistema meteorológico responsável pelas chuvas a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que atua em todo Estado do Ceará (FUNCEME, 2023).

Os solos se apresentam conforme a compartimentação das unidades geomorfológicas que configuram as unidades morfopedológicas. Na área de aluvião são encontrados os Neossolos Flúvicos, com grande potencial agrícola (Souza et al., 2006). No trecho em estudo predomina a Floresta Mista Dicotílio-Palmácea, com predomínio da palmeira carnaúba (*Copernicia prunifera*), entre outras espécies.

Procedimentos metodológicos

A pesquisa apoiou-se na análise sistêmica, para assim, compreender os diferentes condicionantes que atuam de forma direta e indiretamente nos processos de erosão marginal na área estudada. Portanto, para alcançar seus objetivos, o trabalho foi estruturado, metodologicamente, em dois eixos norteadores, representados pela pesquisa teórica e as atividades de monitoramento das margens do rio Jaguaribe que abrangeu nove anos, iniciando em 2015 e finalizando em 2023.

A pesquisa teórica foi a base para o desenvolvimento e entendimento dos processos de erosão marginais e as etapas de seu monitoramento no rio Jaguaribe. Com esse propósito foram levantados estudos clássicos e atuais sobre os temas principais da pesquisa em questão. Assim sendo, foram aprofundados os temas sobre geomorfologia fluvial; análise sistêmica e os estudos fluviais; dinâmica fluvial em rios semiáridos; estabilidade e erosão de margens fluviais; impactos dos barramentos na dinâmica fluvial; vegetação ciliar, além de estudos já realizados na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe.

O segundo eixo metodológico representado pelas atividades de monitoramento foi organizado em cinco etapas, sendo elas: escolha das margens para monitoramento; identificação dos processos erosivos; determinação da taxa de erosão; etapa de laboratório; e etapa de gabinete.

Escolhas das margens

A escolha das margens se deu a partir do grau de conservação da vegetação ciliar e da facilidade de acesso para o acompanhamento/monitoramento. Foram escolhidas nove seções de monitoramento, que foram agrupadas em três tipos de áreas conforme o grau de conservação da vegetação ciliar, sendo elas: Área Conservada (AC) com a vegetação ciliar com suas características naturais, Área Parcialmente Conservada (APC) com presença de vegetação, porém a vegetação ciliar sofreu mudanças nas suas características naturais e Área Degradada (AD) que se destaca pela ausência da vegetação ciliar (Figura 3).

Figura 3 -Tipos de áreas conforme o estado de conservação da vegetação ciliar: (A) Área Conservada, (B) Área Parcialmente Conservada e (C) Área Degradada



Fonte: Os autores, 2015.

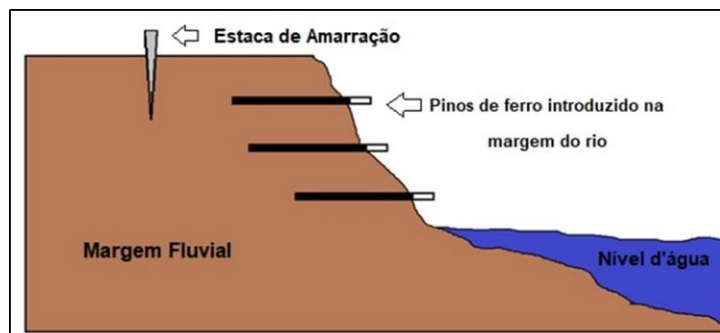
Identificação dos processos erosivos marginais

A identificação dos tipos de processos erosivos predominantes na área de estudo foi realizada através de campanhas de campo. Para isso, as formas erosivas nas seções monitoradas foram registrados em caderneta de campo e fotografados para posteriormente serem caracterizados conforme a literatura.

Determinação da Taxa de erosão

Para acompanhar a dinâmica morfológica das margens monitoradas do rio Jaguaribe através de medições diretas em campo, foi utilizado a metodologia dos pinos de erosão. Segundo Fernandez (1990), o método dos pinos é o mais utilizado na medição da erosão marginal no campo, consiste na introdução de pinos ou pregos na face das margens, cujo recuo do talude da margem é medido pelo grau de exposição do pino de aço ou prego (Figura 4). Esse método foi aplicado e validado por vários pesquisadores ao longo tempo em diferentes regiões do mundo, a exemplo dos trabalhos de Wolman (1959); Thorne e Tovey (1981); Fernandez (1990); Rocha e Souza Filho (2008); Andrade e Maia (2020).

Figura 4 - Representação do método dos pinos



Fonte: Autores, 2024.

Diante disso, foram instrumentalizadas nove seções ao longo do trecho do rio no município de Quixeré. Em cada seção foi instalado uma quantidade específica de pinos, baseado nas características da margem fluvial como altura, ângulo de inclinação e estratificação do talude da margem (Tabela 1).

Os pinos foram instalados no talude da margem a uma distância horizontal de 2,0 m e espaçamento vertical, variando de acordo com a estratificação da margem. Os pinos utilizados eram constituídos de aço (vergalhão), tendo 1,0 m de comprimento por 5/16" (polegadas) de diâmetro. Estes foram introduzidos 90 cm na face do talude da margem, ficando exposto 10 cm que foi pintado de cor branca para facilitar sua localização.

Para registrar e georreferenciar as seções monitoradas e os pinos, utilizou-se máquina fotográfica, caderneta de campo e receptor GPS (Sistema de Posicionamento Global) do tipo *Garmim Etrex*. Também foram escolhidos pontos sobre as margens estudadas para facilitar a identificação das seções e servir como referência, caso o recuo lateral dos taludes fosse superior ao tamanho dos pinos inseridos nas margens. Na porção superior das margens utilizou-se como referência cercas, árvores e piquetes de madeira. Para instrumentalização das margens (com os pinos) foram utilizados trena, piquete de madeira, pino de ferro e marreta. Nessa etapa também foram coletadas amostras de solo das margens estudadas.

Tabela 1 - Características dos pontos de monitoramento da erosão nas margens do rio Jaguaribe

Seções	Número de pinos	Extensão lateral monitorada (m)	Altura da margem (m)
Izídio	6	4,0	5,0
Rio Eduardo	9	4,0	4,0
Canela I	6	4,0	3,0
Canela II	6	4,0	3,1
Água-Fria	6	4,0	4,0
Sinhã	6	4,0	3,0
Rio Cruzes	9	4,0	3,4
Sucurujuba I	9	4,0	2,5
Sucurujuba II	6	4,0	3,5

Fonte: Os autores, 2024.

O processo de escolha das seções de monitoramento e a sua instrumentação foi realizada em julho de 2014 e a partir de 2015 se iniciou o monitoramento, sendo esse realizado mensalmente ou após eventos de chuvas de muita intensidade na área, isto acompanhado pelos dados de variação do nível do rio e de sua vazão.

Etapa de Laboratório

Na etapa de laboratório foram realizadas as análises granulométricas dos sedimentos que compõe as margens monitoradas. As amostras de solcoletados em campo, foram levadas para Laboratório, onde foram secadas em estufa e submetidas aos procedimentos convencionais para análises granulométricas conforme metodologia trabalhada por Suguio (1973). Para determinar a composição granulométrica das amostras, foi utilizado o *software* livre Qualisolo 1.0 desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021).

Etapa de Gabinete

Nesta etapa foram realizadas análises dos dados oriundos dos trabalhos de campo que foram utilizados para determinar a taxa de erosão e o volume erodido das margens. Também foram utilizados dados de precipitações, vazões e cota do rio.

Os dados da vazão diária regularizada e do nível do rio foram obtidos da Estação Fluviométrica de Quixeré (Código 36615000) em operação desde 2005 e monitorada pela CPRM. A estação situa-se à jusante da ponte sobre o rio Jaguaribe no município de Quixeré, ficando aproximadamente, 270 metros da primeira seção de monitoramento (Izídio) e entorno de 10 km da última seção (Sucurujuba II). Já os dados pluviométricos foram obtidos diretamente do portal da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Os dados pluviométricos e fluviométricos foram analisados e interpretados com auxílio do *software* Hidro 1.2, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas (ANA), que facilitou o manuseio dos dados, com a geração de gráficos e planilhas.

A magnitude da erosão (E_m) foi dada em cm/ano ou cm/mês é obtida pelo método dos pinos, sendo calculada mediante a fórmula 1 (Fernandez, 1990):

$$E_m = (L_1 - L_0)/t \quad (1)$$

Em que “ L_1 ” é o comprimento do pino exposto pela erosão (cm), “ L_0 ”, é o comprimento do pino deixado exposto após cada levantamento que foi de 10 cm, e “ t ” representa o tempo transcorrido (meses ou anos) entre cada campanha de campo. A erosão média para cada seção de monitoramento, após cada campanha de medição, foi determinada pelo somatório dos recuos registrados divididos pelo número de pinos instalados na margem.

O volume médio anual de solo erodido em cada seção (V_m) foi obtido pela fórmula 2:

$$V_m = H \cdot E_m \cdot E_l \quad (2)$$

Onde “ H ” é a altura da margem (m), “ E_m ” é a erosão média anual (m/ano) e “ E_l ” é a extensão lateral da margem instrumentada (m).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Fatores meteorológicos e hidrológicos

Para o período avaliado (2015 a 2023), o município de Quixeré apresentou três anos de chuvas abaixo da normal climatológica (2015, 2016 e 2021), evidenciado um período de seca prolongada iniciado em 2012, o que foi observado em todo território cearense. Os anos de 2018 e 2020, apresentaram chuvas acima da média e nos demais anos (2017, 2019, 2022 e 2023) as chuvas ficaram no entorno da normal climatológica (Tabela 2).

Tabela 2 - Chuvas observadas no período avaliado

Ano	Normal climatológica (mm)	Precipitação anual acumulada (mm)	Desvio (%)	Comparação
2015	690,10	520,30	-24,60	Abaixo
2016		386,70	-44,00	Abaixo
2017		664,60	-3,70	Entorno da Média
2018		914,60	32,50	Acima da Média
2019		769,10	11,50	Entorno da Média
2020		1158,70	67,90	Acima da Média
2021		589,00	-14,70	Abaixo
2022		726,10	5,2	Entorno da Média
2023		619,10	-10,30	Entorno da Média

Fonte: FUNCEME, 2023. Organização: Os autores, 2024.

O período de estiagem prolongado vivenciado no estado do Ceará, contribuiu para diminuição da reserva hídrica dos grandes açudes presentes nesse território, entre eles o açude Castanhão que apresentou uma redução significativa no seu volume hídrico impactando diretamente na vazão do rio Jaguaribe e nas diversas atividades socioeconômicas realizadas nas cidades a jusante do reservatório.

Situação semelhante foi observada em outros estados do Nordeste como no RN, PB e PE. Em 2012, início do período prolongado de seca, os reservatórios desses estados contavam com a maior reserva hídrica do período, porém o volume foi restringindo-se até que, entre 2016 e 2018, os volumes atingiram os níveis mínimos, com muitos reservatórios alcançando o volume morto (BRITO et al., 2021). Tal fato também foi observado no Açude Castanhão, esse reservatório no ano de 2018 chegou ao seu volume morto. A variação diária do nível de água de um rio é considerada, um dos fatores mais importantes a serem avaliados nos processos de erosão marginal. Esta variação controla a atuação das forças de origem fluvial sobre os materiais que constituem as margens. Tais forças são representadas pelas correntes e ondas (Hooke, 1980; Fernandez, 1990).

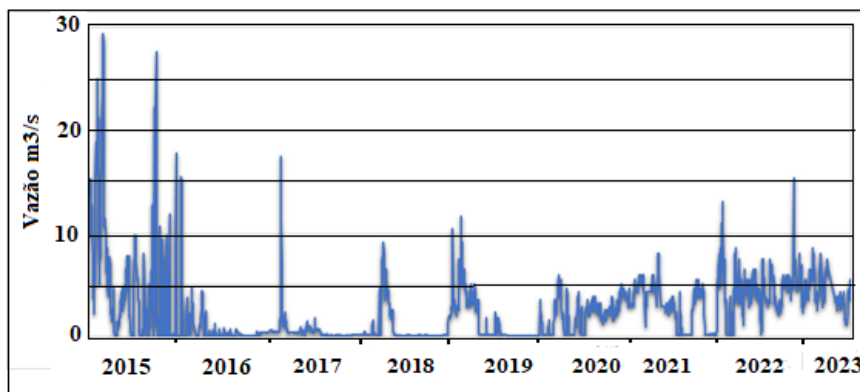
Os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos dentro do canal fluvial são determinados pela distribuição da velocidade e da turbulência do fluxo dentro do canal. Esses processos não são constantes sendo alterados ao longo do tempo e no espaço. Dessa forma, a capacidade de erosão de um rio está relacionada a velocidade e a turbulência, do material transportado (Charlton, 2008; Cunha, 2008; Huggett, 2011).

Os processos fluviais em ambientes semiáridos e sub-úmidos são diferentes dos que ocorrem em ambientes úmidos. Essa diferenciação é o resultado da discrepância dos *inputs* de energia no sistema, em espacial da precipitação, gerando diferenciação das formas e estruturas no sistema (Souza; Almeida, 2015).

A ação erosiva das correntes atua diretamente na base dos taludes das margens, gerando desmoronamentos subaquosos os quais originam o descalçamento das partes superiores do talude. As ondas criadas pelo vento em lagos e reservatórios, apresentam um poder abrasivo sobre a face dos taludes, contribuindo para evolução das margens, através do solapamento dos taludes e, conseqüentemente, desmoronamento da sua parte superior. A magnitude da incidência das ondas está relacionada à direção dos ventos, portanto, as margens que apresentam suas faces no sentido dos ventos são as mais erodidas por tal evento (Hooke, 1980; Fernandez, 1990; Pinto, 2017). Nesse trabalho se avaliou apenas a oscilação das vazões e o nível do rio Jaguaribe no trecho em estudo.

A variação diária da vazão regularizada no período de 2015-2023 é mostrada na Figura 5. A vazão média interanual para este período foi de 2,21 m³/s. As médias das vazões máximas e mínimas ficaram, respectivamente, em 5,54 m³/s e 0,94 m³/s. A maior vazão diária para o período estudado foi de 29,40 m³/s registrada no ano de 2015. As menores vazões registradas ocorreram no ano de 2018, com dias sem registro de vazões, ou seja, sem fluxo no canal fluvial.

Figura 5 - Variação da vazão do rio Jaguaribe na estação Quixeré (Código 36615000) no período 2015-2023



Fonte: ANA, 2023. Elaboração: Os autores, 2024.

Entretanto, no período 2006 a 2010, as vazões na estação de Quixeré alcançaram volumes expressivos, apresentando vazões máximas de 794,76 m³/s (ano de 2009) e 687,30 m³/s (ano de 2008) (Andrade; Fernandez, 2023). Tal fato é explicado pela ocorrência chuvas acima da média histórica registradas naqueles anos de grandes cheias.

Em relação ao nível do rio Jaguaribe no período de estudo ocorrem algumas oscilações, porém não se constatou nenhum registro de cheia no canal, em virtude do período prolongado de estiagem e pela própria regularização do rio pelo Açude Castanhão. Para o período a maior cota que o rio atingiu foi de 256 cm e a menor registrada correspondeu a 18 cm no ano de 2017. No ano de 2009 quando ocorreu a última cheia do rio Jaguaribe a cota máxima registrada foi de 498 cm e a menor 77 cm. A Tabela 3 representa a variação do nível do rio Jaguaribe para o período avaliado.

Tabela 3 - Variação do nível da água no rio Jaguaribe na estação fluviométrica de Quixeré

Ano	Cota Média (cm)	Cota Máxima anual (cm)	Cota Mínima anual (cm)	Amplitude (Cota _{Max} – Cota _{mim})	Vazão Média Anual (m ³ /s)
2015	108	173	27	146	5,13
2016	43	149	22	127	0,69
2017	84	212	18	194	0,51
2018	205	227	175	52	0,71
2019	221	236	203	33	1,45
2020	233	246	144	102	1,99
2021	239	248	214	34	2,80
2022	243	256	203	53	4,44
2023	243	247	240	7	4,43

Fonte: ANA, 2023. Elaboração: Os autores, 2024.

Recuo lateral e processos erosivos predominantes

Os valores obtidos da erosão marginal das seções monitoradas para o período avaliado (2015 – 2023) que corresponde a nove anos de monitoramento foram considerados baixos, sendo a taxa média anual de 7,18 cm/ano e o recuo médio acumulado no valor de 63,24 cm. A Tabela 4 apresenta os resultados do recuo das nove seções avaliadas. Já o volume erodido foi de 1,0 m³/ano e o volume acumulado nas seções foi de 76,73 m³, conforme representado na Tabela 5.

Tabela 4 - Taxa de recuo das seções monitoradas para o período 2015 -2023

Seções	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Recuo acum. (cm)	Taxa anual (cm/ano)
Izídio	30,3	2,7	5,0	2,50	2,2	120	2,5	1,5	3,5	170,2	18,9
Eduardo	3,2	0,7	2,0	4,0	2,3	8,3	2,2	1,3	0,5	24,32	2,7
Canela I	7,1	2,6	4,3	11,7	9,2	41,7	6,3	3,8	1,7	88,4	9,8
Canela II	1,9	0,7	2,2	7,5	1,3	11,7	1,3	4,7	1,2	32,5	3,6
Água Fria	5,7	0,2	1,7	2,8	3,2	5,8	1,2	1,2	0,8	22,6	2,5
Sinhã	1,5	0,7	0,8	25,3	2,7	55	1,5	7,5	2,5	95,0	10,5
Rio Cruzes	1,7	0,2	0,2	2,2	1,9	4,5	1,9	0,8	1,1	14,5	1,6
Sucurujuba I	7,6	0,5	1,8	3,8	2,1	100	4,5	3,3	2,5	126,1	14,0
Sucurujuba II	1,4	0,0	0,0	1,8	0,0	5,8	0,3	0,8	0,0	10,1	1,1

Fonte: Os autores, 2024.

Tabela 5 - Volumes anuais e totais do solo erodido nas seções de monitoramento no rio Jaguaribe entre 2015 e 2023

Seção	Tipo de Área	Volume médio de solo erodido (m³/ano)	Volume acumulado de solo erodido (m³)
Izídio	AD	4,73	42,53
Eduardo	AD	0,43	3,89
Canela I	AD	0,88	7,94
Canela II	APC	0,35	3,11
Água Fria	AC	0,40	3,60
Sinhã	APC	0,95	8,51
Rio Cruzes	AC	0,18	1,66
Sucurujuba I	APC	0,88	7,88
Sucurujuba II	AC	0,13	1,21

Fonte: Os autores, 2024.

Os baixos valores de recuo das margens para o período monitorado pode ser explicado pelas vazões reduzidas que predominaram no rio Jaguaribe, associado as pequenas oscilações no nível do rio, assim como a irregularidade pluviométrica observada durante o período de estudo. Em estudo realizado por Andrade e Maia (2020), no baixo curso do rio Jaguaribe sobre erosão marginal no período de 2014 - 2015, utilizando a metodologia semelhante, também se constataram baixos valores para taxa de erosão e volume. Esses também foram relacionados as baixas precipitações na área de estudo, dado que o comportamento das vazões e do nível do rio apresentaram valores discretos no seu comportamento.

As propriedades mecânicas de uma margem são representadas pela sua composição granulométrica, e no caso da resistência à erosão, é a coesividade uma variável importante. Nesse contexto, a coesividade dos sedimentos é proporcional ao teor de argila, ou seja, quanto maior a quantidade de argila maior é a resistência à erosão (Rocha; Souza Filho, 2008). A Tabela 6, apresenta a composição granulométrica e a classificação textural das margens monitoradas do rio Jaguaribe.

Tabela 6 - Composição granulométrica e classificação textural das margens estudadas

Seções	Tipo de Área	Composição granulométrica (%)				Classificação textural
		Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	
Izídio	APC	14,2	29,4	38,3	18,2	Franca
Eduardo	AC	52,3	37,4	8,2	2,1	Arenosa
Canela I	APC	7,5	67,0	18,1	7,4	Franca Arenosa
Canela II	AC	14,2	29,4	38,3	18,2	Franca
Água Fria	APC	51,4	38,2	7,2	3,2	Arenosa
Sinhã	AC	52,3	37,4	8,2	2,1	Arenosa
Rio Cruzes	APC	16,3	49,3	2,31	13,3	Franca Arenosa
Sucurujuba I	AC	7,5	67,0	18,1	7,4	Franca Arenosa
Sucurujuba II	APC	17,4	22,7	38,2	21,6	Franca

Fonte: Os autores, 2024.

Os sedimentos coesivos são mais resistentes a erosão fluvial, porém quando sofrem solapamento ou ficam saturados, podem sofrer com mais frequência movimentos de massa, como a queda de blocos e deslizamento. Já as margens constituídas por materiais não coesivos são mais susceptíveis a erosão (Thorne; Tovey, 1981; Magalhães, 2010; Santos; Souza, 2020).

Isso pode ser comprovado nos estudos de Fernandez e Fúlfaro (1993), no rio Paraná, onde o caráter não-coesivo dos sedimentos arenosos, permitiu o rápido solapamento do talude das margens por ações das fortes correntes. Já Casado, Holanda e Yagui (2002) em estudos no rio São Francisco identificaram que as margens compostas por material arenoso e sem coesão foram as mais erodidas. Nos estudos de Rocha e Souza Filho (2008) realizados no rio Paraná a taxa de erosão nas margens estudadas aumentou conforme a diminuição do teor de silte/argila nas margens arenosas submetidas à mesma velocidade de fluxo. Já Castro et al. (2019), em estudo feito no rio Claro, afluente do rio Araguaia, observaram que nas margens constituídas por areia média e grossa obtiveram taxas de erosão mais elevadas.

No que se refere as margens estudadas neste trabalho, 71,11% apresentam material mais arenoso e consequentemente foram as margens que mais sofreram perda de sedimentos. Apesar das vazões e do nível do rio serem consideradas as principais condicionantes hidrológicas que atuam na erosão das margens fluviais, para o período avaliado essas variáveis não foram as principais, sendo a precipitação a que obteve maior participação no recuo das margens do rio Jaguaribe. Andrade e Cavalcante (2014); Andrade e Maia (2020), em trabalhos no rio Jaguaribe, também constataram que as precipitações foram a principal condicionante do recuo das margens.

Foram agrupadas as seções monitoradas em três tipos de Área: Área Conservada (AC), Área Parcialmente Conservada (APC) e Área Degradada (AD). A taxa de erosão e o volume erodido foi maior nas áreas AD (54,36 m³) e nas APC (19,5 m³) e menor nas áreas AC (6,47 m³), mostrando a importância da mata ciliar na estabilidade das margens.

Em estudos realizados por Konsoer *et al.* (2015), no baixo curso do rio Wabash, nos Estados Unidos, a mata ciliar aumenta substancialmente a resistência à erosão do material das margens através do sistema radicular. As raízes fornecem um adicional estimado de ~15 kPa de coesão, resultando em uma duplicação da resistência coesiva fornecida pelos sedimentos de granulação fina da margem. Por isso, as árvores ribeirinhas são capazes de reduzir as taxas de erosão e estabilizar as margens em um grande rio sinuoso.

Purvis e Fox (2016), em trabalho realizado no riacho *Spavinaw Creek*, estado de Arkansas, observaram que as margens que apresentavam vegetação ripária tiveram, em média, três vezes menos recuo do que as margens desprotegidas de vegetação ciliar. Já Andrade e Maia (2020), em trabalho sobre erosão de margens realizado no baixo curso do rio Jaguaribe, também perceberam que as margens com vegetação ciliar conservada foram as que apresentaram as menores taxas de erosão anual.

Os processos erosivos observados nas nove seções de monitoradas para o período estudado foram: corrasão fluvial e pluvial, desmoronamento por cisalhamento, e erosão subsuperficial (*piping*). A Tabela 7, sintetiza os dados apresentados em cada seção de monitoramento. Em seguida será caracterizado o comportamento da erosão e os processos erosivos predominantes nos três tipos de áreas.

Tabela 7 - Síntese dos dados texturais, de erosão, precipitação e vazão nas seções estudadas

Seções	Tipo de Área	Classif. Textural	Altura e Largura da margem (m)	Recuo total da margem (cm)	Volume total do talude erodido (m ³)	Média e desvio padrão da Precip.(mm)	Média e desvio padrão da vazão(m ³ /s)
Izídio	AD	Franca	5,0 – 4,0	170,2	42,53		
Eduardo	AD	Arenosa	4,0 – 4,0	24,3	3,89		
Canela I	AD	Franco Arenosa	3,0 – 4,0	88,4	7,94		
Canela II	APC	Franca	3,1 – 4,0	32,5	3,11		
Água Fria	AC	Arenosa	4,0 – 4,0	22,6	3,60		
Sinhã	APC	Arenosa	3,0 – 4,0	95,0	8,51	705,35 (227)	2,46 (1,81)
Rio Cruzes	AC	Franco Arenosa	3,4 – 4,0	14,5	1,66		
Sucuru. I	APC	Franco Arenosa	2,5 – 4,0	126,1	7,88		
Sucuru.II	AC	Franca	3,5 – 4,0	10,1	1,21		
			Total	583,7	80,33		

Fonte: Os autores, 2024.

Áreas conservadas (AC)

O grupo de Área Conservada é formado pelas seções Água Fria, Rio Cruzes e Sucurujuba II, essas margens apresentaram, as seguintes taxas de recuo anual 2,5 cm, 1,6 cm e 1,1 cm, respectivamente. O volume erodido acumulado nas AC foi de 6,47 m³, correspondendo a 8,43 % do volume total erodido (76,73 m³). O principal processo erosivo observado nas três seções foi a corrasão pluvial, evidenciado pela exposição dos pinos inseridos na face do talude (Figura 6). Conforme Kinnell (2005), o desprendimento e transporte de sedimentos pode ocorrer em virtude das gotas de chuvas e do fluxo superficial, atuando de forma isolada ou conjunta. A seção Sucurujuba II foi a que obteve a menor taxa de erosão (1,1 cm/ano) correspondendo apenas 1,43 % do volume total erodido, apesar de se localizar na parte côncava do canal que naturalmente é suscetível a erosão. As baixas taxas de erosão observadas nessa seção podem estar relacionadas ao bom estado de conservação da vegetação ciliar e a ausência de atividades permanentes sobre a margem como agricultura irrigada, carcinicultura, criação de animais e outras, além da sua composição granulométrica, caracterizada como uma margem franca com alto teor de silte (mais resistente a erosão).

Figura 6 - Pino exposto pelo escoamento dos fluxos superficiais na seção Sucurujuba II, representado pela seta amarela



Fonte: Os autores, 2016.

Outro fator relevante que deve ser considerado, é que a seção está situada a jusante (130 metros) da passagem molhada de Sucurujuba, isso contribui para barrar o fluxo de água no canal, reduzindo a velocidade das águas no entorno da margem. Além disso, nos anos de 2018 e 2019 o fluxo hídrico nessa seção foi muito baixo em virtude das premissas de liberação das águas do Açude Castanhão, adotadas pelo Comitê da Sub-bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe (CSBHBJ), onde o Colegiado determinou a passagem molhada de Sucurujuba como o último ponto de chegada das águas do rio Jaguaribe, ficando o trecho do rio a jusante dessa área sem fluxo.

Assim como na seção Sucurujuba II, a seção Rio Cruzes, também apresentou período sem fluxo no canal. Isso pode ter contribuído para redução do seu recuo, além da ausência de outros processos erosivos. Vale destacar que essas margens apesar das baixas taxas erosivas, são margens que apresentam uma certa fragilidade em virtude do solapamento da base dos seus taludes deixado pela última cheia ocorrida no ano de 2009.

Áreas parcialmente conservadas (APC)

O grupo das APC é formado pelas seções Canela II, Sinhã e Sucurujuba I, sendo a taxa de erosão anual para cada seção, respectivamente, de 3,6 cm/ano, 10,5 cm/ano e 14,0 cm/ano. O volume erodido nas APC correspondeu a 19,50 m³, isso significa 25,41 % do volume acumulado, sendo a seção Sucurujuba I a que apresentou maior taxa de recuo anual acompanhado da seção Sinhã que exibiu o

maior volume erodido nesse grupo de áreas. Porém, comparando com as demais seções estudadas, Sinhã foi a segunda em volume erodido, representando 11,09 % do volume total erodido, mesmo se tratando de uma margem APC. Fernandez e Fúlfaro (1993), afirmam que a erosão marginal pode apresentar diferentes variações espaciais e temporais.

Já a seção Canela II apresentou o menor recuo e volume erodido dentro desse grupo. Essa seção teve um comportamento muito semelhante as seções enquadradas no tipo de Área Conservada. Nessa área o principal processo erosivo foi a corrasão pluvial.

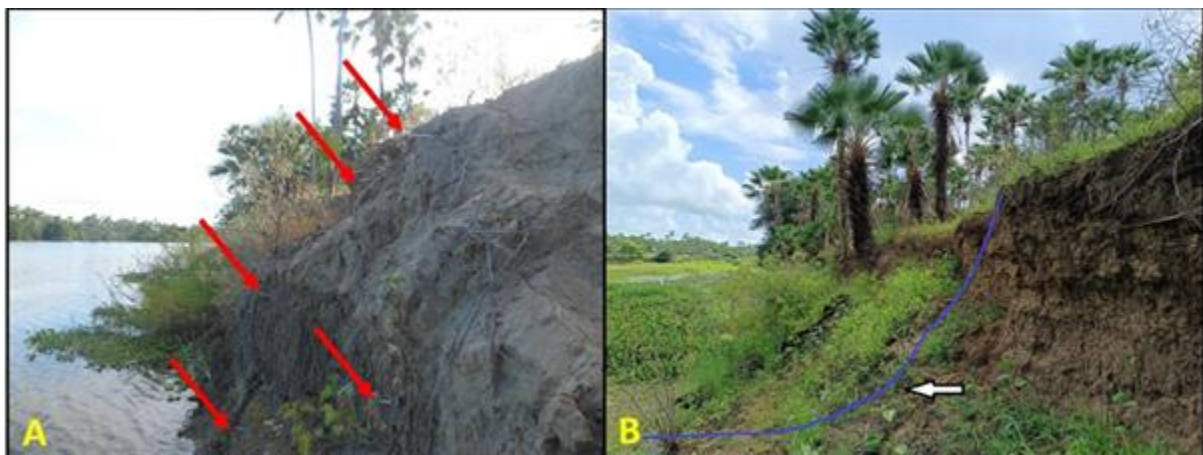
Na seção Sucurujuba I, foi presenciada a atuação conjunta de três processos erosivos sendo eles: corrasão pluvial que prevaleceu por todo período avaliado, processo de corrasão fluvial muito evidenciado no ano de 2015, que resultou no solapamento da base do talude (Figura 7), e o desabamento por cisalhamento em 2020, removendo todos os pinos expostos na face do talude (Figura 8). A seção Sucurujuba I é a que tem a menor altura (2,5 m), portanto, mesmo apresentando uma taxa de recuo superior a seção Sinhã, o volume erodido foi menor.

Figura 7 - Processo de corrasão fluvial na seção Sucurujuba I no ano de 2015



Fonte: Os autores, 2015.

Figura 8 - Na Imagem (A) as setas vermelhas indicam os pinos de erosão inseridos no talude em 2014. Já a imagem (B) indica a remoção de todos os pinos pelo processo de cisalhamento em 2020. A linha azul representa a mudança morfológica da margem. A seta branca representa o material depositado na base do talude na Seção Sucurujuba I



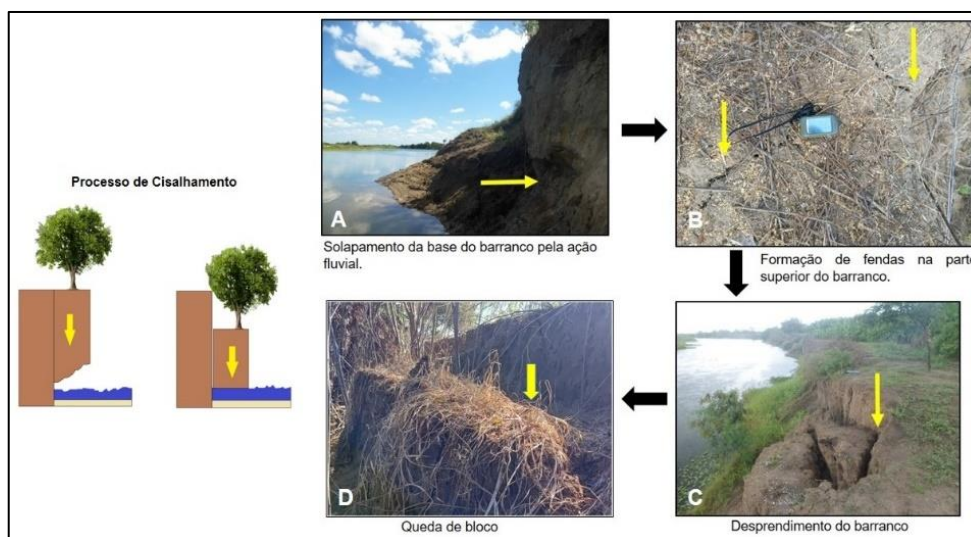
Fonte: Os autores, 2020.

Já a seção Sinhã teve como principal processo erosivo o desmoronamento por cisalhamento, evidenciado nos anos de 2018 e 2022. Isso contribuiu para o soterramento de alguns pinos pela deposição de sedimentos na base do talude, assim como a remoção de quatro pinos pelo processo erosivo descrito.

Áreas Degradadas (AD)

O grupo AD é representado pelas seções Izídio, Eduardo e Canela I, apresentando taxa de recuo anual de 18,90 cm/ano, 2,70 cm/ano e 9,80 cm/ano, respectivamente. O volume erodido nesse grupo de área correspondeu a 61,72% do volume total. A seção Izídio, foi a que apresentou a maior taxa de erosão (18,90 cm ano⁻¹) e conseqüentemente, o maior volume erodido (55,42% do total). Isso pode ser explicado pelo material que constitui o talude, o processo erosivo predominante e a ausência da vegetação ciliar decorrente das atividades agrícolas desenvolvidas sobre a margem. A seção em questão apresenta uma composição granulométrica fraco arenosa, sendo mais vulnerável a erosão, além de ser uma margem côncava onde ocorre a maior velocidade e turbulência da água nas suas intermediações proporcionando, assim, a erosão. Nessa margem predominou o processo de corrasão, realizado pelo solapamento da base do talude. No ano de 2020, a margem foi afetada pelo processo de cisalhamento (Figura 9), com perda total dos pinos de erosão. Outro fator importante que pode estar relacionado a perda elevada de sedimentos nessa seção é a sua altura (5,0 m) e seu ângulo (aproximadamente 90°) de inclinação muito íngreme, além das formas de uso incompatíveis com a legislação ambiental com a remoção da vegetação ciliar.

Figura 9 - Esquema do processo de cisalhamento na seção Izídio



Fonte: Os autores, 2020.

A seção Eduardo, dentro desse grupo, foi a que obteve o menor recuo. Mesmo se tratando do grupo AD, correspondendo apenas 5,06 % do volume erodido, essa seção obteve comportamento muito semelhante as margens preservadas com baixas taxas de erosão. Isso pode ser explicado por ser uma margem rampeada dificultando os processos de desmoronamento, bem como, o fato de estar a jusante de uma passagem molhada, o que diminui a velocidade do fluxo sobre a base do talude, fato que também foi observado na seção Sucurujuba II, relatado anteriormente. Para o período estudado o principal processo erosivo nessa seção foi a erosão por escorrimento.

A seção Canelas I apresentou a terceira maior taxa de erosão. O volume de material medido nessa margem correspondeu à 10,34 % do total. Sobre os processos erosivos predominantes nessa seção destaca-se o processo de erosão por corrasão pluvial e a erosão subsuperficial (*piping*).

O processo de remoção de partículas de solo ocasionado pela erosão subsuperficial é denominado de *piping* ou erosão em dutos. De acordo com Salomão (2010), esse processo provoca a remoção de partículas do interior do solo formando canais que evoluem em sentido contrário ao do fluxo de água, podendo dar origem a formação de voçorocas com o colapso do terreno e seu respectivo desabamento.

Os dutos se formam a partir do carreamento de pequenas partículas de solo (argila e outros colóides), ou através da remoção dos componentes do solo por solução, ou seja, pelo *piping*. O transporte dos sedimentos do solo se faz através do carreamento de sólidos e componentes dissolvidos em rotas preferenciais, o que lhe confere tanto a atuação das forças físicas e químicas (Augustin; Aranha, 2006).

De acordo com Bernatex-Jakiel e Poesen (2018), os processos de erosão por dutos estão relacionados tanto a causas naturais como ocasionadas pelas ações humanas. Esse processo é encontrado em diferentes regiões com diferentes climas, topografias, textura de solo e tipos de vegetação.

Na área em estudo foi possível observar a erosão subterrânea na seção Canela I (Figura 10). Na superfície da margem são observadas várias depressões formadas pelo desabamento do teto dos dutos (Figura 10A) e orifícios de saída do fluxo subterrâneo na base do talude da margem (Figura 10B). O aumento do diâmetro das depressões permite a conexão de tais estruturas e a formação de voçorocas, que aumentam a erosão superficial nas áreas afetadas. Em seus estudos, Augustin e Aranha (2006), encontraram processos semelhantes em Gouveia, no Estado de Minas Gerais, onde foi observado dutos em colapso, porém não conectados a voçorocas.

Figura 10 - Processo de erosão subsuperficial na seção Canela I, margem direita do rio Jaguaribe. Em A são apresentadas as depressões formadas pelos degraus de abatimento (setas amarelas). Em B são mostradas as saídas dos dutos na base da margem (setas azuis)



Fonte: Os autores, 2023.

Em trabalho realizado por Pereyra et al. (2020), na planície do Chaco, noroeste da Argentina, que fica situado numa região semiárida, tais autores encontraram processos erosivos semelhantes ao do rio Jaguaribe, sendo que esses estão dispersos em uma região plana com declividade entre 1 e 3%. Nesta foram identificados 70 locais afetados por *pipes* com colapso do seu teto. Já Xavier et al. (2023), em estudos realizados na bacia do Riacho da Cachoeirinha, no semiárido da Paraíba, observaram processos de erosão subsuperficial (*seepage* e *piping*) que contribuíram para formação de voçorocas nas margens do canal fluvial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o período avaliado a taxa de erosão e o volume erodido no trecho estudado do rio Jaguaribe foram considerados baixos. Isso pode estar relacionado com as baixas vazões no rio e ausência de cheias em virtude da irregularidade pluviométrica. A principal variável que impulsionou a erosão das margens do rio Jaguaribe foram as precipitações, que no semiárido apresentam comportamentos bem diferentes,

sendo essas mal distribuídas ao longo do ano e com ocorrências de períodos prolongados de estiagem ou eventos com anos com chuvas bem acima da média histórica. As seções enquadradas em Área Degradada (AD) foram as que apresentaram os maiores recuos de margens e, conseqüentemente, maiores volumes de sedimentos removidos. Já as Áreas Conservadas (AC) foram as que apresentaram os menores valores de erosão e volume de sedimentos. Isso reforça a importância da preservação da vegetação ciliar.

Para o trecho avaliado os principais processos erosivos identificados foram: corrasão fluvial e pluvial, desmoronamento por cisalhamento, e erosão subsuperficial (*piping*), sendo esse último processo observado em 2019, merecendo maiores aprofundamentos.

Embora o volume erodido pareça ser baixo, é necessário considerar que esses dados representam apenas um pequeno recorte do rio Jaguaribe, sendo necessário uma avaliação mais ampla. Quando analisamos e dimensionamos estes valores para todo o canal, sem dúvida é preocupante o volume, em toneladas anuais, que é lançado dentro do canal

No grupo de Áreas Degradadas e Parcialmente Conservadas se faz necessário a adoção de técnicas que minimizem a erosão marginal. A exemplo disso, destacamos o uso da bioengenharia do solo (Sutili; Durlo; Bressan, 2004; Araújo Filho, 2012), que é uma técnica eficiente e de baixo custo de aplicação, além de possibilitar a participação da população ribeirinha local no processo de implementação e acompanhamento dessa solução.

Por último, destacamos que a regularização do fluxo e conseqüente aumento das taxas de assoreamento tem contribuído sobremaneira para as mudanças nos padrões no canal principal. Nesse sentido, o sistema fluvial funciona de forma conjunta, estabelecendo processos de retroalimentação necessários à sua manutenção e condição de equilíbrio. Tais estudos são importantes, inclusive, para estudos futuros quanto ao entendimento dos processos de assoreamento que em associação aos estudos hidrodinâmicos e sedimentológicos podem trazer boas respostas às previsões futuras.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema de Informações Hidrológicas - HIDROWEB**. 2023. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em set. de 2023.

ANDRADE, J. H. R.; FERNANDEZ, O. V. Q. Mudanças morfológicas na seção transversal de um rio com alta açudagem: estudo de caso no rio Jaguaribe no município de Quixeré - Ceará. **Boletim de Geografia**, v. 40, p. 385-398, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v40.a2022.e63261>.

ANDRADE, J. H. R.; MAIA, C. E. Avaliação dos processos de erosão de margens em rios semiáridos: estudo na sub-bacia do Baixo Jaguaribe – Ceará – Brasil. **Boletim de Geografia**, v. 37, n. 3, p. 71-84, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i3.41548>

ANDRADE, J.H.R.; CAVALCANTE, A. A. Processos erosivos marginais no Baixo Jaguaribe: Estudo de caso no rio Jaguaribe – Ceará – Brasil. **Revista GEONORTE**, v.5, n.20, p.429-432, 2014.

ARAÚJO FILHO, R. N. DE. **Comportamento de talude da margem do rio São Francisco submetido à técnica de bioengenharia de solos**. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Sergipe, UFS. São Cristóvão, 2012. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/6641>. Acesso em 19 de ago. de 2024.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 1, p. 09-18, 2006. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v7i1.56>

BARROS, L. F. DE P.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Bases teóricas e fatores controladores da dinâmica fluvial. In: MAGALHÃES JÚNIOR, A.P.; BARROS, L.F.DE P. (Eds.) **Hidrogeomorfologia: formas, processos e registros sedimentares fluviais**. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2020.

BERNATEX-JAKIEL, A.; POESEN, J. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 1107-1128, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006>

BEST, J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. **Nature Geoscience**, v.12, p.7–21, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0262-x>

BEZERRA, D. B.B. **Impactos de passagens molhadas na morfodinâmica fluvial do baixo curso do rio Jaguaribe**: uma análise a partir da barragem das pedrinhas em Limoeiro do Norte – Ceará. 2012. 114f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, UECE. Fortaleza, 2010. Disponível em: <https://siduece.uece.br/siduece/trabalhoAcademicoPublico.jsf?id=67802> Acesso em: 13 de jun. 2023.

BRANDT, S. A. Classification of Geomorphological effects downstream of Dams. **Catena**, n. 40, p. 375 – 401, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00093-X)

BRITO, Y. M. A., BRITO, H. C., RUFINO, I. A. A., BRAGA, C.F.C. Panorama da seca plurianual 2012–2018 no semiárido brasileiro: impactos hidrológicos, agrícolas e medidas de convivência. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 58, p. 911-931, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v58i0.74667>

CASADO, A. P. B., HOLANDA, F. S. R.; YAGUIU, P. Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco (perímetro irrigado Cotinguiba /Pindoba - SE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26(1), p.231-239, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000100024>

CASTRO, A.; COSTA, A. T. da; CARNEIRO NETO, J.A.; MORAIS, J.S.D. da; CLAUDINO-SALES, V. de. Expedição científica ao alto curso do Rio Jaguaribe (Ceará): identificação da nascente do possível maior rio temporário do mundo. **Caderno de Geografia**, v.30, n. 63, p. 956 – 974, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2020v30n63p956>

CASTRO, W. DE S., DE-CAMPOS, A. B.; ZANCOPE, M. H. C. A influência dos materiais das margens e da vegetação ciliar na erosão de meandros: o caso do rio Claro, afluente do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n.3, p.624 – 240, 2019. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i3.1584>

CAVALCANTE, A. A. **Morfodinâmica fluvial em rios semiáridos**: O rio Jaguaribe a jusante da barragem do Castanhão – CE – Brasil. 2012. 228 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal Fluminense, UFF. Niterói, 2012. Disponível em: <https://siduece.uece.br/siduece/trabalhoAcademicoPublico.jsf?id=72335>. Acesso em: 06 de jan. 2024.

CAVALCANTE, A.A. Distribuição temporal de descargas e alterações morfológica em rios semiáridos: o rio Jaguaribe no Ceará, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 35, p.28-36, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v35i0.133598>

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Caderno regional da sub-bacia do Baixo Jaguaribe / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos**. Fortaleza:INESP, 2009.

CHARLTON, R. **Fundamentals of Fluvial Geomorphology**. Routledge: New York, 2008. <https://doi.org/10.4324/9780203371084>

COELHO, A. L. N. Geomorfologia Fluvial de Rios Impactados por Barragens. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia. v. 9, n.26, 2008. <https://doi.org/10.14393/RCG92615721>

COGERH – Companhia de Recursos Hídricos do Ceará. **Atlas dos Recursos hídricos**. 2023. Disponível em <http://atlas.cogerh.com.br/>. Acesso em 19 de jan. 2023.

COSTA, C. A. da. **Marcas da ocupação do solo na dinâmica fluvial no médio-baixo Jaguaribe-CE**. 2009. 144f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, UECE. Fortaleza, 2009. Disponível em: <http://siduece.uece.br/siduece/trabalhoAcademicoPublico.jsf?id=59579>. Acesso em 07 de jan. 2024.

CUNHA, S. B. da. Geomorfologia fluvial. In: Guerra, A. J. T.; CUNHA, S. B. DA (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de base e conceitos**. 8ª.ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2008, p. 211 – 246.

CUNHA, S. B. da. Rios Desnaturalizados. In: BARBOSA, J.L. LIMONAD, E. **Ordenamento territorial e ambiental**. Niterói: Editora da UFF, 2013, p.171 -191.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias**. Disponível em: <https://www.cnpdia.embrapa.br/downloads/qualisolo/>. Acesso em: 12 de jun. 2021.

FERNANDEZ, O.V.Q. **Mudanças no Canal Fluvial do rio Paraná e Processos Erosivos nas Margens: região de Porto Rico-PR**. 1990. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, UNESP. Rio Claro, 1990.

FERNANDEZ, O.V.Q.; FULFARO, V. J. Magnitudes e processos da erosão marginal no rio Paraná, trecho de Porto Rico, PR. **Geografia**, Rio Claro, n. 18, p. 97 – 114, 1993.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. 2023. Disponível em <http://www.funceme.br/> . Acesso em: 21 out. 2023.

SUTILI, F.J.; DURLO, M. A.; BRESSAN, D. A. Potencial biotécnico do Sarandi-branco (*phyllanthus sellowianus* Müll. Arg.) e vime (*salix viminalis* L.) para revegetação de margens de cursos de água. **Ciência Florestal**, v.14, p.13 – 20, 2004. <https://doi.org/10.5902/198050981777>

GAZOLLA, B. L.; GONÇALVES, F.V. Caracterização do processo de erosão das margens do Rio Miranda na Região do Passo do Lontra, Corumbá, Mato Grosso do Sul. **Anuário do Instituto de Geociência (UFRJ)**, v. 40-2, p.144-152, 2017. https://doi.org/10.11137/2017_2_144_152

GROSSI HIJO, C. A. G. **Quantificação do efeito do açude Castanhão sobre o fluxo fluvial de material particulado em suspensão e nutrientes para o estuário do rio Jaguaribe, Ceará – Brasil**. 2009. 39 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) -Universidade Federal do Ceará, UFC. Fortaleza, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11428>. Acesso em: 06 de dez. 2023. GUO, C.; JIN, Z., GUO, L.; LU, J.; REN, S.; ZHOU, Y. On the cumulative dam impact in the upper Changjiang River: Streamflow and sediment load changes. **Catena**, vol. 184, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104250>

HOOKE, J. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. **Earth Surface Processes**, v. 5, p. 143-157, 1980. <https://doi.org/10.1002/esp.3760050205>

HUGGETT, R. **Fundamentals of Geomorphology**. 2ª Ed. Londres: Taylor and Francis, 2011. <https://doi.org/10.4324/9780203860083>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas municipais**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html> Acesso em 01 de jan. 2024.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Limites municipais**. 2018. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/limites-municipais/> Acesso em 01 de jan. 2024.

KINNELL, P.I.A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review. **Hydrological Processes: An International Journal**, v.19.14, p.2815-2844, 2005. <https://doi.org/10.1002/hyp.5788>

KONSOER, K. M.; RHOADS, B. L.; LANGENDOEN, E. J.; BEST, J. L.; URSIC, M. E.; ABAD, J. D.; GARCIA, M. H. Spatial variability in bank resistance to erosion on a large meandering, mixed bedrock-alluvial river. **Geomorphology**, v. 252, p.80 – 97, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.08.002>

KUMMU, M.; LU, X.X.; RASPHONE A.; SARKKULA, J.; KOPONEN, J. Riverbank changes along the Mekong River: Remote sensing detection in the Vientiane–Nong Khai area. **Quaternary International**, v.186 (1), p.100 –112, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.10.015>

LYU, Y.; FAGHERAZZI, S.; TAN, G.; ZHENG, S.; FENG, Z.; HAN, S.; SHU, C. Hydrodynamic and geomorphic adjustments of channel bars in the Yichang-Chenglingji Reach of the Middle Yangtze River in response to the Three Gorges Dam operation. **Catena**, v. 193, p.104628, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104628>

MAGALHÃES, H. E. S. **Avaliação do estado de potencial erosão de margens de um curso de água: aplicação nos troços estuarinos de rios do norte de Portugal**. 2010. 122 f Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP. Porto, 2010. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/60520>. Acesso em 03 de dez. de 2023.

PEREYRA, M.A.; FERNÁNDEZ, D.S.; MARCIAL, E.R.; PUCHULU, M.E. Agricultural land degradation by piping erosion in Chaco Plain, Northwestern Argentina. **Catena**, v. 185, 104295, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104295>

PINTO, A. A. S. **Estabilidade de margens fluviais: Uma abordagem multifuncional**. 2017. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto FEUP. Porto, 2017. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/111852>. Acesso 03 de dez. de 2023.

- PURVIS, R. A.; FOX, G. A. Streambank sediment loading rates at the watershed scale and the benefit of riparian protection. **Earth Surf Process Landforms**, v. 41, p. 1327-1336, 2016. <https://doi.org/10.1002/esp.3901>
- RAHMAN, M.D.S.; GAIN, A. Adaptation to river bank erosion induced displacement in Koyra Upazila of Bangladesh. **Progress in Disaster Science**, v. 5, p. 100055, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100055>
- ROCHA, P. C.; SOUZA FILHO, E. E. de. Erosão marginal e evolução hidrodinâmica no sistema rio-planície fluvial do Alto Paraná-Centro Sul do Brasil. In: NUNES, J.O.R.; ROCHA, P. C. (Orgs.). **Geomorfologia: aplicações e metodologias**. São Paulo: Expressão Popular (UNESP). Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2008, p. 133–154.
- ROSS, J.L.S. **Ecogeografia do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- SALOMÃO, F. X. T. Controle e Prevenção de Processos Erosivos. In: GUERRA, A. J, T; SILVA, A.S; BOTELHO, R. G. M. (Orgs). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 5ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010, p. 229-268.
- SANTOS, C.J. S; SOUZA, J.O.P. Análise da Estabilidade Lateral em Trechos Fluviais da Bacia Riacho do Tigre, Semiárido Paraibano. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia/MG, v. 21, n. 75, p. 15- 33, 2020. <https://doi.org/10.14393/RCG217542320>
- SIQUEIRA, A.G.; AZEVEDO, A. A.; SOUZA, L.A.P.; SILVA, M. da. Modificações fluviais à jusante de barragens. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)**, v.3, n.1, p.113-123, 2013.
- SOUZA, J.O.P. de; ALMEIDA, J.D.M. Processos fluviais em terras secas: uma revisão. **Okara**: v.9, n.1, p.108-122, 2015.
- SOUZA, M.J.N. DE; OLIVEIRA, V.P.de; NASCIMENTO, F.R. do; CORREIA, L.J. Diagnóstico geoambiental do Baixo Jaguaribe. In: ROSA, M. DE F.; GONDIM, R.S.; FIGUEIREDO, M.C. B.DE. **Gestão sustentável no Baixo Jaguaribe, Ceará**. Fortaleza: Embrapa Agroindustrial Tropical, 2006, p.25-45.
- STEVAUX, J.C; LATRUBESSE, E.M. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- SUGUIO, K. **Introdução a Sedimentologia**. São Paulo: Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, 1973.
- SUGUIO, K.; BIGARELLA, J.J. **Ambientes Fluviais**. 2ª Ed. Florianópolis: Editora da UFSC: Editora da Universidade Federal do Paraná, 1990, 183p.
- THORNE, C.R.; TOVEY, N.K. Stability of composite river banks. **Earth Surface Processes and Landforms**. Wiley InterScience. v. 6, n. 5, p. 469-484, 1981. <https://doi.org/10.1002/esp.3290060507>
- TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos hídricos no Século XXI**. São Paulo: Oficina de Texto, 2011.
- WOLMAN, M.G. Factors influencing erosion of a cohesive river bank. **Am. J. Sci.**,v. 257, p. 204-216, 1959. <https://doi.org/10.2475/ajs.257.3.204>
- XAVIER, R. A.; BORGES NETO, I.D.O.; SOUZA, J.J.L.L.D.; CARDOSO, P.V.; SOUZA, J.O. P. D.; SOUZA, B. I. D. Processos de voçorocamento no Planalto da Borborema, semiárido da Paraíba. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 24, Número Especial, 2023. <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2359>
- ZAIMES, G.N.; SCHULTZ, R.C. Riparian land-use impacts on bank erosion and deposition of an incised stream in north-central Iowa, USA. **Catena**. v.125, p.61-73, 2015.

Recebido em: 27/04/2024

Aceito para publicação em: 04/09/2024