

# MODELAGEM ESPACIAL DA EROÇÃO POR PERDA DE SEDIMENTOS PARA A REGIÃO DA SUB-BACIA DO RIO ARACOIABA - CEARÁ E SUA INFLUÊNCIA NO ASSOREAMENTO DOS CURSOS FLUVIAIS

Luis Felipe Santos Moura<sup>1</sup>

Carlos Henrique Sopchaki<sup>2</sup>

## RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo realizar uma espacialização da produção de sedimentos provocadas por erosão utilizando-se do método RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), investigar a importância da cobertura do solo para a preservação da região através da análise de risco a erosão potencial e, por último, correlacionar estes dados com uma estimativa de taxa de assoreamento dos cursos fluviais perante dois cenários na região da sub-bacia do rio Aracoiaba, Ceará, utilizando-se de ferramentas de geoprocessamento. Os resultados demonstram que a espacialização da produção de sedimentos demonstrou-se muito bem distribuídas entre as classes com perda média de 48,55 t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Os dados de erosão potencial indicam que se não fosse o uso e cobertura do solo, especialmente da Área de Proteção Ambiental (APA), a classe muito baixa de perda do solo seria até 17 vezes menor e a classe muito alta até 3 vezes maior. Já os dados de estimativa de assoreamento indicam para o primeiro cenário que a taxa de assoreamento é relativamente menor que a média mundial com uma taxa de 9,027%, comparado aos 10,000% em média mundial, e, para o segundo cenário, considerando 250 amostras ao longo dos cursos fluviais, apontou-se as áreas mais suscetíveis da bacia variando com taxas entre 6,09% e 13,66%, as taxas mais altas foram identificadas na região centro-sudoeste e nordeste da bacia. Por fim, apontam-se recomendações para mitigar tais problemas.

**Palavras-chave:** perda de solos; uso e ocupação; assoreamento.

## SPATIAL MODELING OF EROSION DUE TO SEDIMENT LOSS FOR THE ARACOIABA RIVER SUB-BASIN REGION - CEARÁ AND ITS INFLUENCE ON THE SILTMEN OF RIVER COURSES

### ABSTRACT

This research aims to perform a spatialization of the production of sediments caused by erosion using the RUSLE method (*Revised Universal Soil Loss Equation*), to investigate the importance of soil cover for the preservation of the region through the risk analysis of potential erosion and, finally, to correlate these data with an estimate of the siltation rate of river courses in two scenarios in the region of the Aracoiaba river sub-basin, Ceará, using geoprocessing tools. The results demonstrate that the spatial distribution of sediment production was very well distributed among classes with an average loss of 48.55 t.ha<sup>-1</sup>.year<sup>-1</sup>. Potential erosion data indicate that if it were not for land use and land cover, especially in the Environmental Protection Area (APA), the very low class of soil loss would be up to 17 times lower and the very high class up to 3 times higher. The silting estimate data indicate for the first scenario that the silting rate is relatively lower than the world average with a rate of 9.027%, compared to 10.000% in the world average, and, for the second scenario, considering 250 samples at the along the river courses, the most susceptible areas of the basin were identified, varying with rates between 6.09% and 13.66%, the highest rates were identified in the central-southwest and northeast regions of the basin. Finally, recommendations are made to mitigate such problems.

**Keywords:** soil loss; land use and occupation; silting up.

<sup>1</sup> Mestrando em geografia pela Universidade Federal do Ceará. Contato: felipesantos010186@gmail.com

<sup>2</sup> Doutor em Geografia, Docente do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Ceará. Contato: carlos.geografia@ufc.br

## INTRODUÇÃO

O excesso de atividades antrópicas tem provocado diversas alterações no meio ambiente, modificando desde a dinâmica dos sedimentos do solo e acarretando em problemas como a desertificação. São os solos também vítimas pelos principais danos antropogênicos, pois é nele que se assentam os agrupamentos humanos, as atividades agropecuárias e grande parte das atividades essenciais para o progresso da humanidade.

Estas atividades degradadoras ao solo provocam a desagregação dos sedimentos e a exposição da capa pedológica, que por sua vez, inferem o risco à erosão. Esta dinâmica implica ainda no esgotamento de nutrientes, arenização, laterização, salinização e até contaminação do solo por poluição.

Analisando a mitigação dessa problemática, Mafra (1997) relata que deve ser incorporado ao planejamento do uso do solo, o estudo da erosão incluindo os fatores relacionados à atuação dos processos erosivos e as áreas mais suscetíveis com o objetivo de regular as ações sobre as mesmas. Um dos métodos existentes para avaliar e prever as perdas de solo por erosão é a técnica de mapeamento RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) de Renard *et al.* (1991), adaptada de Wischmeier & Smith (1978). Essa técnica engloba uma série de fatores tais como: erosividade da chuva, erosividade pela topografia, erodibilidade do solo e erodibilidade por cobertura e manejo do solo e fator de práticas conservacionistas, manipulados em cartografia de síntese nos sistemas de informações geográficas (SIG). Este modelo também é muito aplicado para estimar perda anual média de solos, apresentando acurácia aceitável a nível quantitativo (KINNEL, 2010).

Levando-se em consideração que o método RUSLE é capaz de modelar a estimativa de produção de sedimentos por erosão e degradação de uma determinada região, a associação entre este método e a análise do fluxo do transporte dessas partículas pode prever o nível de assoreamento, ocasionando no aumento de inundação e alagamentos ao alterar a dinâmica do talvegue (CARVALHO *et al.*, 2000; CASSETI, 1995).

À vista disso, empregando o mapeamento dos locais mais suscetíveis a degradação pode-se perceber os ambientes de maior atenção nas políticas ambientais, de risco socioambiental e na promoção da sustentabilidade do complexo fluvial à nível de bacia hidrográfica.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo mapear e caracterizar a perda de solo por erosão e também avaliar a suscetibilidade ao assoreamento dos cursos fluviais, na sub-bacia hidrográfica do rio Aracoiaba, região do maciço do Baturité, estado do Ceará, utilizando-se de técnicas de geoprocessamento dentro do sistema de informações geográficas (SIG), visando

contribuir com a gestão e conservação do solo e dos cursos fluviais.

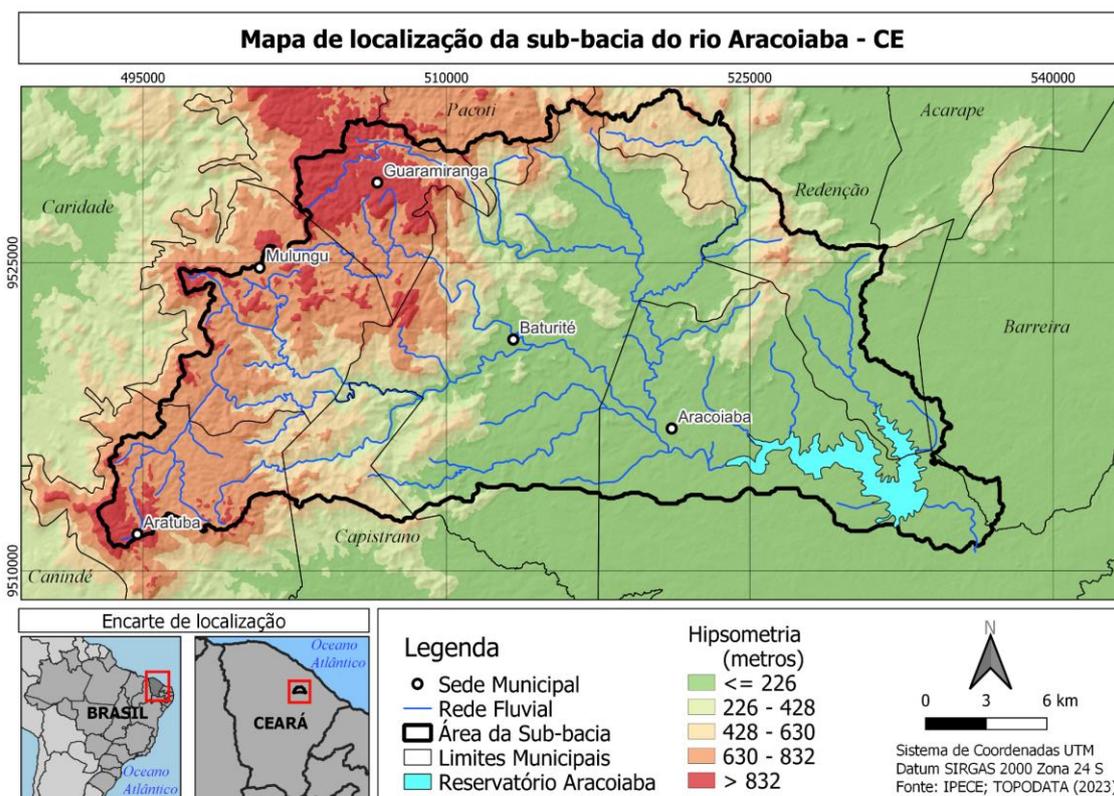
## METODOLOGIA

### Área de Estudo

A sub-bacia do rio Aracoiaba localiza-se na região do maciço do Baturité no Nordeste do Estado do Ceará e circunscreve nove municípios em uma área de 588,09km<sup>2</sup>, incluindo a sede urbana de cinco municípios como Guaramiranga, Aratuba, Mulungu, Baturité e Aracoiaba (figura 1).

Nesta região a paisagem se destaca pela presença do maciço cristalino de Baturité com elevada altimetria na porção ocidental, que decresce à medida que se desloca para o leste/sul, assim como ocorre com a pluviometria. Conta ainda com a presença da APA do Maciço do Baturité, delimitada pela cota acima de 600 metros englobando uma cobertura vegetal complexa, com refúgio de fauna e flora exótica e manutenção de importantes bacias hidrográficas. Esta peculiaridade provoca o surgimento de um ambiente de exceção dentro do semiárido e que estimula a atração de turistas das mais diversas partes do estado e também pelo Brasil.

**Figura 1** - Mapa de localização.



**Fonte:** elaborado pelos autores (2023).

Pesquisas anteriores na mesma sub-bacia, como de Carvalho *et al.* (1993), avaliaram o nível de erosão de solos, porém não avaliaram a perda a nível quantitativo e também não estimaram as taxas

de assoreamento.

Estimativa de perda de solos

As variáveis do RUSLE foram modeladas utilizando o ambiente SIG através do *software* Qgis 3.22.14. Para estimar a perda média de solos foi utilizado a equação 1, através do método de álgebra de mapas, com o uso da ferramenta calculadora *raster*.

$$A = R * K * LS * CP \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que: **A** é a estimativa de perda de solo (em t.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); **R** é o fator de erosividade por pluviometria (em MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>); **K** é o fator de erosividade do solo (em t.ha.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>); **LS** é a erosividade pelo fator topográfico (sem grandeza) e **CP** é o fator de erosividade pelo uso e manejo do solo (sem grandeza).

Para prever a erosividade por pluviometria (fator R), Wischmeier & Smith (1978) salientam que deve ser mensurado a intensidade da precipitação em um intervalo de 30 minutos. Entretanto, devido à escassez de dados para se obter *in loco* e de forma detalhada, essa metodologia original torna-se inviável, principalmente também porque a bacia e as adjacências possuem postos pluviométricos que registram dados diários.

Dessa forma, foram pesquisados diversos métodos para estimar a vulnerabilidade pela pluviometria com mensuração mais acessível, como o de Bertoni & Lombardi Neto (2012), que utilizam de uma equação para determinação da erosividade baseados em dados como precipitação média mensal e anual. A mensuração levou em conta 21 postos pluviométricos dentro e fora da bacia hidrográfica sendo aplicada a equação 2. Os dados dos postos foram adquiridos através da FUNCEME (2023).

$$EI = 67,355 * \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,85} \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que: **EI** é a média mensal do índice de erosão; **r** é a precipitação mensal para um mês considerado e **P** retrata a precipitação média anual para postos com série histórica de no mínimo 15 anos.

A validação espacial e temporal dos dados pluviométricos seguiu a metodologia proposta por Baba (2014), na qual os dados são comparados com o dos postos vizinhos por meio de interpolação por regressão linear que utiliza os valores conhecidos em cada ponto para estimar o valor de cada pixel

no restante da imagem, que nesse caso foi elaborado a partir de ferramentas de geoestatística do SAGA no programa Qgis. A avaliação dos valores finais está disposta conforme o quadro 1 e estão baseados na pesquisa de Carvalho (1994).

**Quadro 1** - Avaliação dos valores para o fator de erosividade por pluviometria

Intervalo (MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Avaliação
R < 250	Baixa erosividade
250 < R < 500	Média erosividade
500 < R < 750	Média a forte erosividade
750 < R < 1000	Forte erosividade
R > 1000	Muito forte erosividade

**Fonte:** Carvalho (1994).

Para o fator de erosividade do solo (fator K), originalmente recomenda-se que o solo deva ser avaliado conforme a quantidade de solo erodida em determinada área de 25m x 4m em um declive de 9% mediante uma observação temporal de vários anos. Porém na literatura já existem diversas pesquisas que avaliam os limites de tolerância de perda de solo de acordo com diversos tipos de ordem e subordem (quadro 2), além de optar por isso, resolveu-se classificar os solos por grupo hidrológico de solos para sintetizar os vários níveis categóricos. O intuito é evitar uma possível interferência de saturação por bases (eutrofismo e distrofismo) e outras propriedades do solo na análise de permeabilidade e na avaliação de erosividade.

Os dados pedológicos foram extraídos de IBGE (2021) na escala 1:250.000 e o levantamento dos grupos hidrológicos de solos estão baseados em Sartori (2004) e SCS (1972) *apud* Mockus (2004).

**Quadro 2** - Valores para o fator de erosividade para o fator K.

Subordem de solos	Grupo Hidrológico	Valor de erosividade (t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Fonte
Argissolo vermelho-amarelo eutrófico	Grupo C	0,069725	Fiorio (1998)
Argissolos vermelho-amarelo distrófico			
Planossolos Hápicos	Grupo D	0,043	Jardim <i>et al.</i>

			(2017)
--	--	--	--------

**Fonte:** elaborado pelos autores (2023).

Os dados para o fator topográfico (fator LS) estão baseados na fusão de dois fatores: o índice de comprimento da rampa/vertente (L) e o índice de declividade (S). Os dados foram adquiridos de um modelo digital de elevação (MDE) e são provenientes do projeto TOPODATA com resolução de 30 metros (VALERIANO, 2005).

Para se obter o fator de comprimento da rampa (fator L) foi aplicada a equação 3, baseada nos estudos de Bertoni & Lombardi Neto (2012). Posteriormente, baseado nos dados do fator L, foi calculado o fator topográfico (fator LS), conforme indicado pela equação 4.

$$L = \sqrt{P^2 + \left[\left(\frac{D}{100}\right) * P\right]^2} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$LS = 0,00984 * L^{0,63} * D^{1,18} \quad \text{(Equação 4)}$$

Em que: **P** é o tamanho do pixel do MDE (30 metros) e **D** é a declividade em porcentagem.

Para o fator de uso e manejo do solo (fator CP), são levados em consideração dois fatores: C, que avalia os índices de uso e manejo do solo, e P, que avalia as práticas conservacionistas. Na área de pesquisa, a identificação de práticas conservacionistas, como por exemplo, plantio morro abaixo, plantio em curva de nível, alternância de cultivos em curva e sem plantio são identificadas de modo pouco usual ou inexistente, tendo prevalência, portanto, de agricultura rudimentar e áreas conservadas da Área de Proteção Ambiental do Maciço do Baturité.

Conforme Stein *et al.* (1987), a avaliação de modo separado dos fatores C e P são mais recomendáveis quando se deseja avaliar a aptidão agrícola de uma região. Assim, os fatores C e P podem ser utilizados como um só, prevalecendo o fator de uso e manejo do solo, conforme apontam os estudos de Silva *et al.* (2017).

A obtenção do fator CP foi elaborada a partir de uma vetorização manual de imagens de satélite Landsat-8 com cenas de caminho 217/063 com data de 6 de setembro de 2020 utilizando as bandas espectrais 4, 3 e 2 (visível) com resolução espacial melhorada de 30 para 15 metros através da fusão com a banda 8 (pancromática) e com auxílio de imagens Google Satélite para validação das menores feições.

Foram convencionadas as seguintes classes de uso e manejo do solo: estradas; sede municipal; agricultura; campo, pasto e solo exposto; localidades, distritos e outros; vegetação herbácea/rasteira; vegetação de várzea e corpos hídricos; vegetação arbustiva densa; e vegetação florestal/área preservada. Depois as classes de uso e manejo do solo foram reclassificadas conforme pesquisa bibliográfica e estão dispostos no quadro 3.

Os valores do fator de uso e manejo do solo indicam que quando o fator CP tende a 1, maiores são os índices de erosividade.

**Quadro 3** - Valores dos coeficientes de erosividade para o uso e manejo do solo

Classe de uso e manejo do solo	Fator C	Fator C médio	Referências
Estradas	1,0	1,0	Castro <i>et al.</i> (1994)
Sede municipal	0,001	0,0155	Farinasso <i>et al.</i> (2006)
	0,030		Wischmeier & Smith (1978)
Agricultura	0,290	0,1774	Bertoni & Lombardi Neto (2014)
	0,0648		Didoné <i>et al.</i> (2014)
Campo, pasto e solo exposto	0,05	0,525	Silva <i>et al.</i> (2010)
	1,0		Macedo <i>et al.</i> (2012)
Localidades, distritos e outros	0,001	0,1005	Farinasso <i>et al.</i> (2006)
	0,200		Morgan (2005)
Vegetação herbácea/rasteira	0,005	0,005	Silva <i>et al.</i> (2010)
Vegetação de várzea e corpos hídricos	0,0004	0,0002	Silva <i>et al.</i> (2010)
	0		Bertoni & Lombardi Neto (2014)
Vegetação florestal/área preservada	0,00004	0,00004	Silva <i>et al.</i> (2010)

Vegetação Arbustiva Densa	0,0010	0,0007	Graça <i>et al.</i> (2015)
	0,0004		Demarchi (2012)

**Fonte:** elaborado pelos autores (2023).

Após a produção dos mapas, os fatores que estavam em formato vetorial foram reclassificados para *raster* utilizando-se ferramentas em SIG e padronizados para uma resolução espacial de 15 metros. O fator A foi adaptado e hierarquizado conforme a classificação de Borges (2009) que varia com grandeza de  $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$  em: nulo a muito baixo (0 - 10); baixo (10 - 15); médio (15 - 20); alto (20 - 200) e muito alto (>200).

Após esta etapa, foi elaborado um mapa de risco potencial à erosão que considera apenas as variáveis naturais (fator R, K, L e S). A finalidade é discutir e relacioná-lo com a importância do uso e cobertura do solo e conseqüentemente na preservação à perda de sedimentos. A escala de grandeza também é em  $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$  em: nulo a muito baixo (0 - 2); baixo (2 - 4); médio (4 - 6); alto (6 - 20) e muito alto (>20).

#### Estimativa de assoreamento

Com os dados de perda média de solos é possível realizar uma estimativa de taxa de assoreamento para algum setor de referência da bacia baseado no método RUSLE, associado à razão de aporte de sedimentos (RAS), que considera a taxa de erosão no exutório da bacia ou qualquer outro ponto (WALLING, 1983; BRANCO, 1998). Assim a quantidade de aporte de sedimentos assoreados é estimada conforme a equação 5.

$$Ps = ML * RAS \quad \text{(Equação 5)}$$

Em que: **Ps** é produção de sedimentos assoreados (t); **ML** é a massa de sedimentos erodida localmente na bacia por unidade de área ( $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ); e **RAS** é a fração percentual do sedimento que consegue atingir a rede de drenagem. O RAS foi calculado a partir da equação de Maner *apud* Araujo (2003) que considera fundamentalmente a influência da declividade e o transporte difuso e é dada pela equação 6.

$$\text{Log (RAS (\%))} = 2,943 - 0,824 * \text{Log} \left( \frac{Lm}{Fr} \right) \quad \text{(Equação 6)}$$

Em que: **Lm** é o comprimento máximo da bacia em linha reta paralelo ao tributário principal; **Fr** é a diferença entre a cota média do divisor de água e a cota do exutório em metros.

Este método de estimação de razão de aporte de sedimentos já foi aplicado em bacias do semiárido brasileiro tendo como base a análise do assoreamento para reservatórios tal como no trabalho de Araújo (2003), permitindo a sua aplicabilidade para a área de pesquisa.

Diante dessa metodologia, o presente estudo contemplou uma espacialização de nível de assoreamento para dois cenários possíveis conforme setores de referência da bacia: um primeiro cenário estimando quantitativamente a retenção média de sedimentos para toda a sub-bacia baseada nas unidades de referência de perda de solos desconsiderando a captura de sedimentos nos reservatórios à montante, e um segundo cenário considerando duzentos e cinquenta pontos amostrais aleatórios com distância mínima de 1km ao longo dos cursos fluviais, o objetivo é modelar a propagação de sedimentos que atingem aqueles pontos.

Para este segundo cenário, os dados dos pontos amostrais foram interpolados utilizando-se do método de krigagem ordinária, observada sua conveniência a partir de análise variográfica com o intuito de estimar as taxas de assoreamento entre os pares amostrais nos cursos fluviais, em seguida, a área interpolada foi recortada de modo a visualizar apenas o traçado dos cursos fluviais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

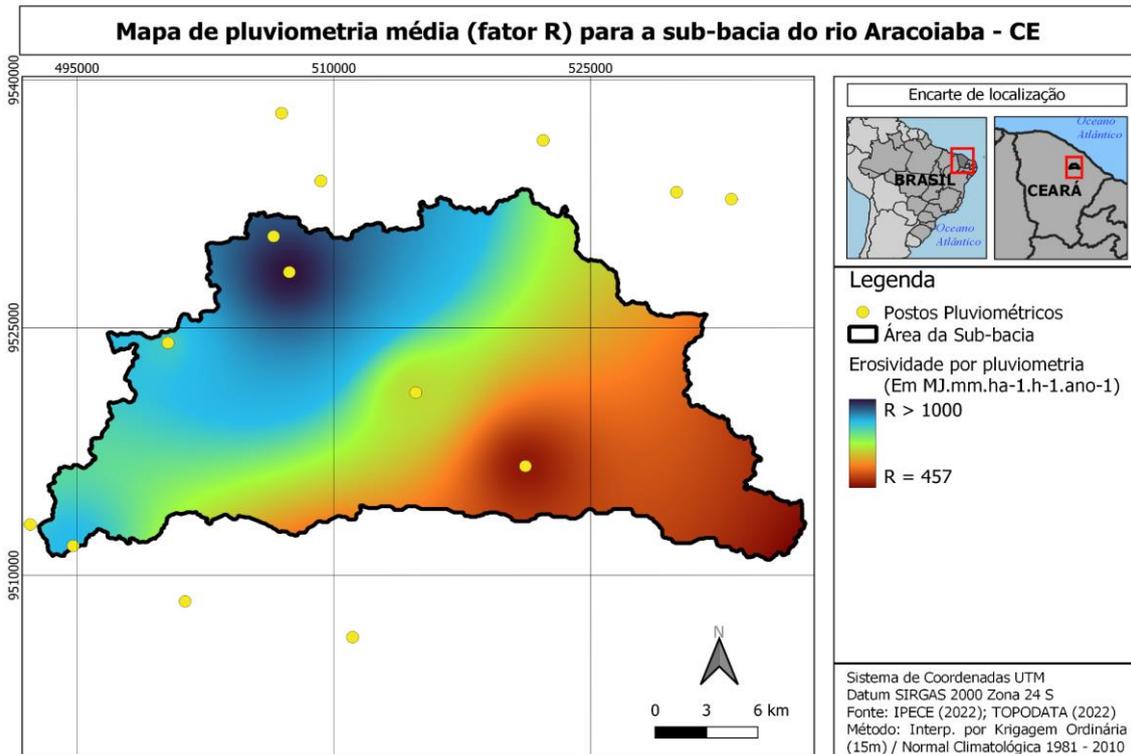
### Estimativa de produção de sedimentos por meio do método RUSLE

A implantação da Área de Proteção do Maciço do Baturité é essencial para resguardar o meio ambiente e evitar a suscetibilidade aos diferentes tipos de erosão e dessa forma reduzir a perda de sedimentos, impactando na minimização do assoreamento dos rios. Todavia, a ocupação histórica da região e o forte de incentivo ao turismo que induz à especulação imobiliária, que tem provocado mudanças antropogênicas intensas que vão desde a implantação de conglomerados residenciais, vastos campos agropastoris, solo exposto e até mineração. Em relação às zonas urbanas existe uma singularidade: se por um lado o sítio urbano atua como excelente fator redutor na perda de sedimentos, por outro, as periferias urbanas tornam-se ambientes propícios a falta de sua cobertura, se devendo sobretudo a localização de lotes e terrenos, indústrias, vias não asfaltadas e etc.

Observando os fatores de erosividade, no fator R, identificou-se que a pluviometria gera entre

457,19 e 1.185,14 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> com uma média de 722,74 MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> classificando-se como erosividade de média a forte, conforme se observa a figura 2.

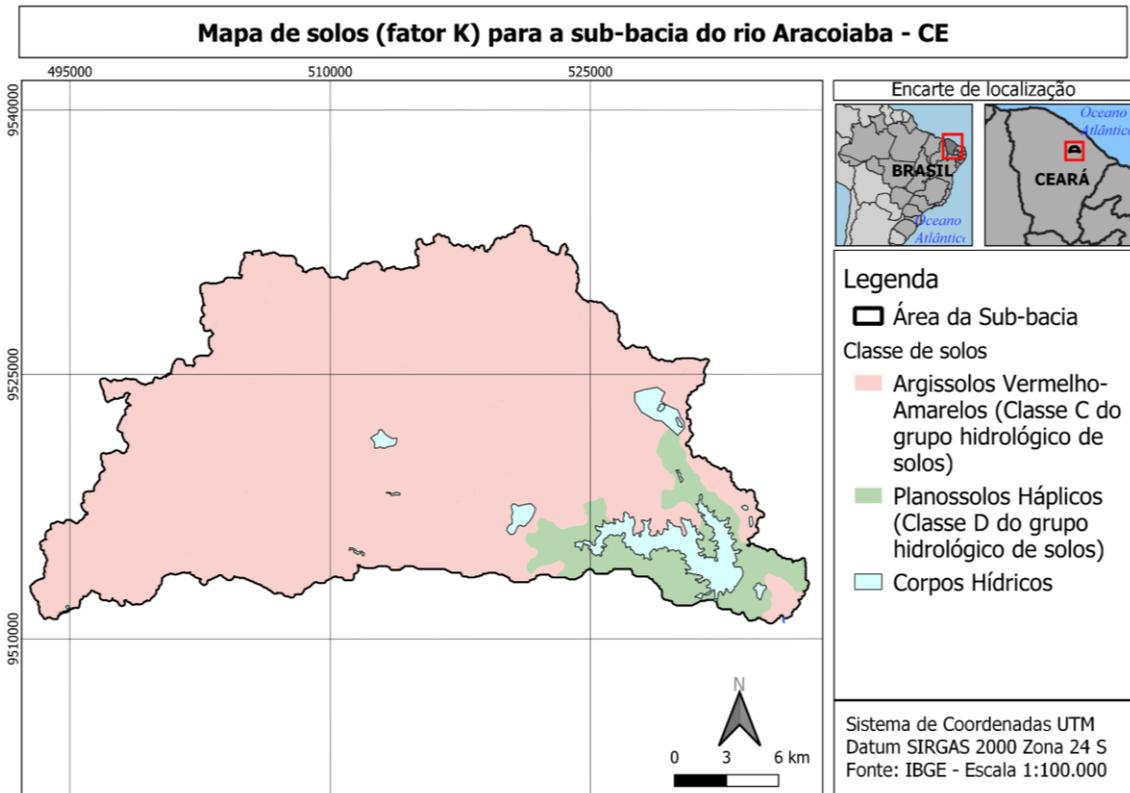
Figura 2 - Mapa do fator R.



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Os valores indicam que o nível energético de erosividade da precipitação tem elevada amplitude, apresentando uma transição abrupta em um curto intervalo espacial de acordo com a transição gradual entre os maciços residuais cristalinos e a depressão sertaneja. Porém, conforme salienta Bertoni & Lombardi Neto (2012), o fator de erosividade não é proporcional à pluviometria média anual, mas sim depende de como a chuva se distribui no período analisado, porém, pesquisas de Aquino, Oliveira e Sales (2006) demonstram que há uma correlação de 99% entre os dois aspectos. Para o fator K (figura 3), na zona úmida do Maciço do Baturité predominam os argissolos vermelho-amarelo distróficos com pedogênese predominante de alta lixiviação e drenagem profunda. Na zona intermediária ou subúmida há o predomínio dos argissolos vermelho-amarelos eutróficos. E na região de depressão sertaneja, à leste, há o predomínio dos planossolos háplicos que são ricos em argilas, com drenagem imperfeita e facilidade com encharcamento no período úmido. A distribuição se dá com 82,11% da bacia com argissolos (48.698 ha) e 17,89% correspondendo à planossolos (10.611 ha).

Figura 3 - Mapa do fator K.



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

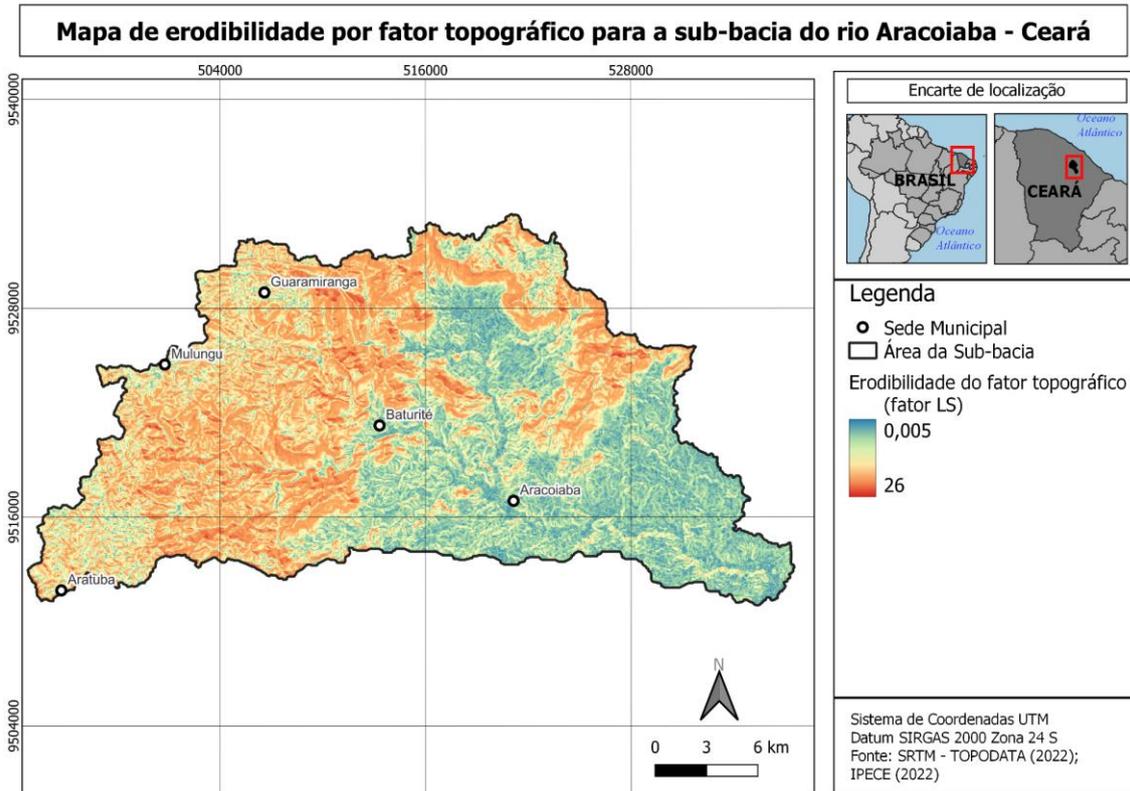
Ambos solos da sub-bacia variam de argilosos a muito argilosos e, por possuírem alta coesão entre as partículas granulométricas, apresentam maior escoamento superficial o que implica em maior volume de material transportado devido à baixa drenagem, além disso, a água que consegue infiltrar é lentamente retirada, mantendo-se úmido por mais tempo, conforme relata IBGE (2007). Ademais, os planossolos, por sua vez, apresentam solos menos profundos que os argissolos e possuem teor maior de argila com horizonte B menos permeável.

Relativo a topografia, a declividade em graus da bacia hidrográfica varia de  $0,03^\circ$  a  $45,78^\circ$  onde as zonas declivosas se estendem por quase metade da área da bacia por influência de maciços residuais cristalinos que ocorrem de forma indiscriminada, mas que no baixo curso da bacia torna-se pediplanado, servindo inclusive de espaço para o Açude Aracoiaba com capacidade para 163 milhões de  $m^3$  no exultório. O fator de comprimento da rampa teve como amplitude uma variação entre 0,0 e 56 metros e indica de forma implícita a velocidade do escoamento, sendo as áreas mais escarpadas, em geral, as que possuem maior fator de comprimento da rampa.

A sintetização dos fatores LS gerou o mapa de fator topográfico (figura 4), que indica um relevo com rugosidade predominante e explicita uma morfologia de denudação dos relevos com forte carreamento de sedimentos em função da geomorfologia. Os menores valores do fator topográfico

encontram-se sob áreas inundáveis, interflúvios e rios ou riachos de alta ordem hídrica, deixando implícito a suscetibilidade ao assoreamento das calhas fluviais.

**Figura 4 - Mapa do fator LS.**

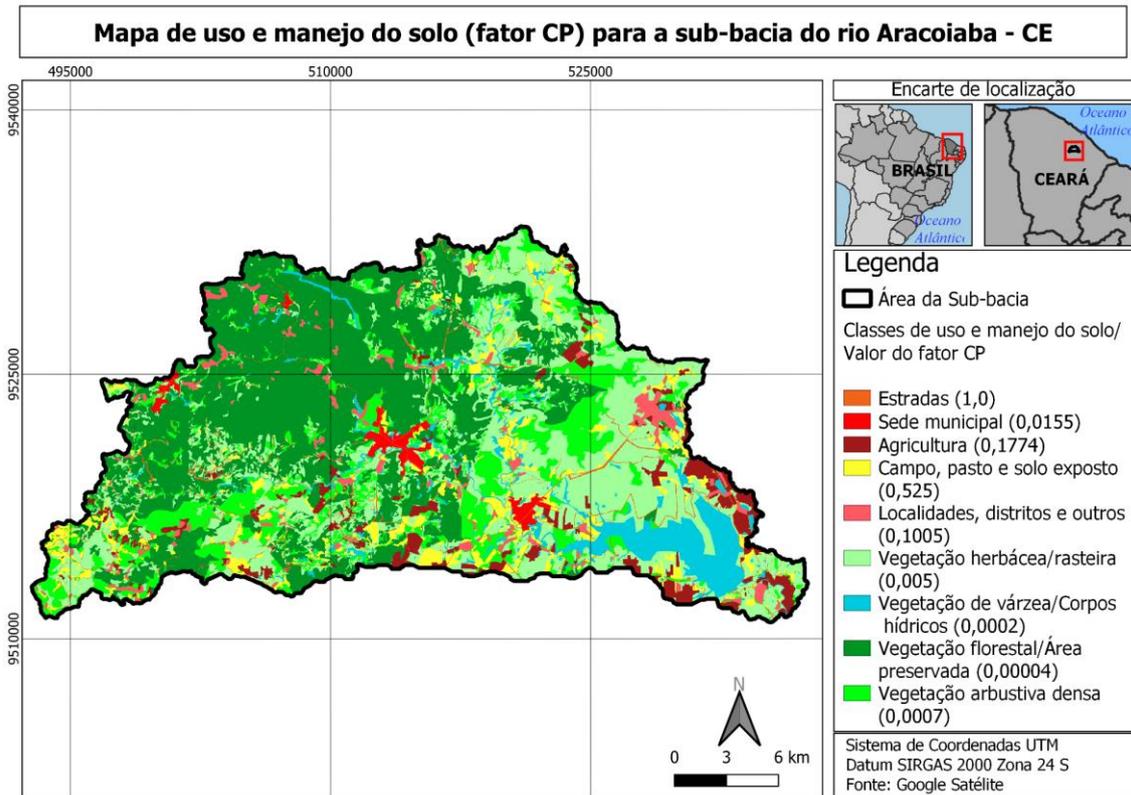


**Fonte:** elaborado pelos autores (2023).

Em relação ao fator de uso e ocupação do solo, a maior parte das atividades degradantes mais evidentes ao meio ambiente estão localizadas na região intermediária da bacia e no baixo curso, as práticas agrícolas por exemplo são ainda muito antiquadas, expondo os solos ou deixando-os passivos à queimadas, principalmente oriundos do cultivo de milho, feijão e mandioca, acarretando no maior carreamento de sedimentos durante eventos pluviométricos.

Conforme observa-se na figura 5, nas áreas de vegetação florestal, que inclui a mata úmida da APA, prevalece uma maior conservação do solo mediante proteção normativa, porém é uma situação provisória tendo em vista a alta especulação imobiliária da região e a chegada de indústrias, principalmente de água mineral, tendem a reduzir cada vez mais a suprimir o espaço vegetativo.

Figura 5 - Mapa do fator CP.



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Analisando a estimativa de produção de sedimentos, fator A, descreve-se no quadro 4 como as classes de perda de solo se distribuem quantitativamente e sua frequência. Estimou-se que em média a sub-bacia do rio Aracoiaba perde  $48,55 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , o que a enquadra como classe de risco médio de perda de solos. A análise do desvio padrão dos dados indica que os valores de perda são dispersos, variando-se para até um máximo de  $588,30 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Estes valores mais excessivos encontram-se principalmente no município de Baturité e disseminado ao longo do maciço, onde os fatores em questão mais combinam elementos de topografias escarpadas em conjunto com um uso do solo degradativo, totalizando em uma perda de sedimentos anuais de  $867.412,36 \text{ t.ano}^{-1}$

Quadro 4 - Classe de risco e sua distribuição de perda de solos (fator A) para a bacia do rio Aracoiaba

Classe de risco em $\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$	Área em hectares	Frequência em porcentagem
Nulo a muito baixo (0 - 10)	10.156	17,27%

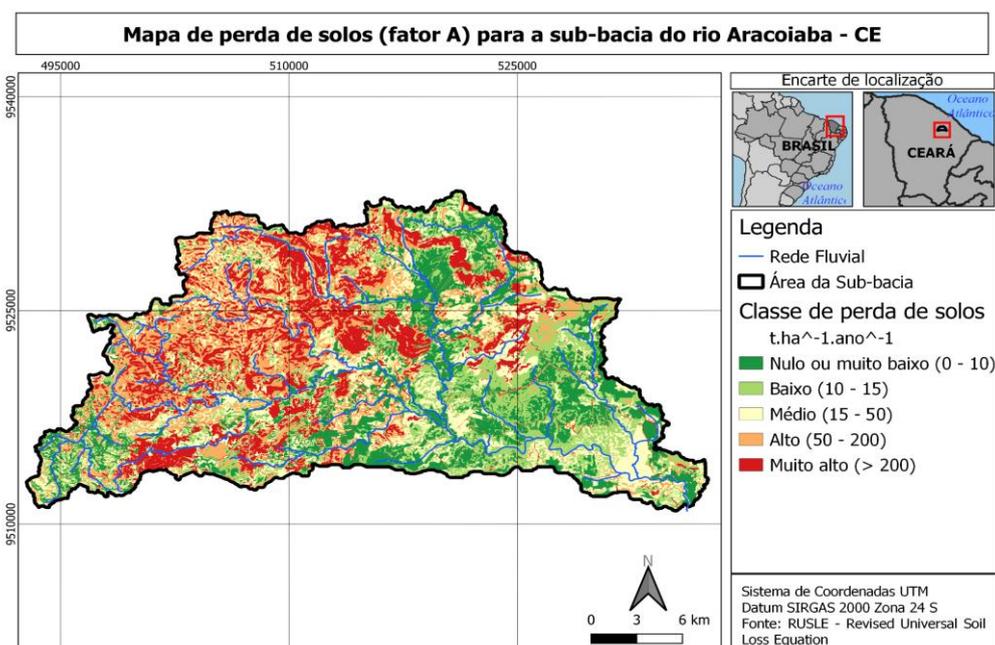
Baixo (10 - 15)	14.202	24,15%
Médio (15 - 50)	7.809	13,28%
Alto (50 - 200)	15.119	25,71%
Muito alto (>200)	11.520	19,59%
<b>Total</b>	<b>58.809 ha</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

A figura 6 discrimina a distribuição do quantitativo de perda do solo para a bacia do rio Aracoíaba, indicando que o percentual das classes se organiza de forma congruente ao longo da bacia, sendo a classe baixa a de maior proporção, seguido da classe alta. As categorias de perda de solo baixa e nula ou muito baixa 45,30% da área de estudo, enquanto que as categorias alta e muito alta somam 41,42%, confirmando a proporcionalidade.

A semiaridez, que reflete na função edafológica, indica uma camada vegetativa efêmera contra os processos erosivos mediante eventos pluviométricos concentrados na quadra chuvosa. Os tipos de solo também contribuem para a perda de solo mediante a facilitação no processo de carreamento de sedimentos, mesmo em áreas pediplanadas onde deveria ocorrer o processo de recepção desses sedimentos.

**Figura 6** - Mapa do fator A de perda de solos da bacia do rio Aracoíaba.

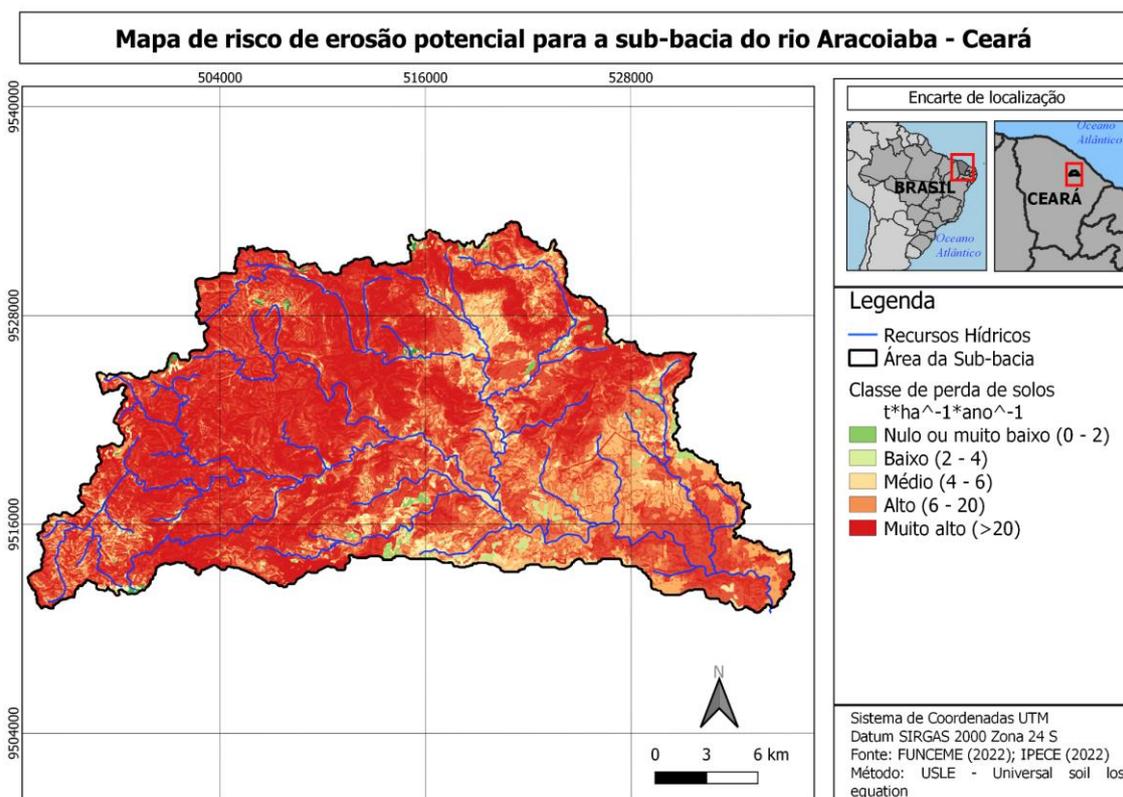


Fonte: elaborado pelos autores (2023).

A cobertura do solo é de extrema importância para a sua conservação, no propósito de comprovar esse fato, elaborou-se um mapa de risco potencial à erosão (figura 7) que leva em consideração apenas os fatores físicos do meio geográfico (fatores R, K, L e S). Observa-se que a sub-bacia poderia sofrer severos índices de erosão na hipótese da ausência de cobertura do solo, que atua como elemento mitigador da perda de sedimentos e pode ser notada ao comparar quantitativamente através da observação da distribuição e frequência das classes.

Nessa configuração, se observa detalhadamente, conforme o quadro 5, que a vegetação florestada do Maciço do Baturité tem importância extrema na conservação dos solos, com apenas pontos casuais de baixos índices de erosão potencial. Os dados, por exemplo, apontam que a classe muito alto risco a erosão potencial (57,14%) são quase três vezes maiores do que a classe de muito alto risco do fator A (19,59%) e são até onze vezes menores para o índice muito baixo risco de erosão potencial (1,56%) comparado com o do fator A (17,27%). Para ambos os índices, as taxas mais baixas são mais frequentes no Sul e na porção oriental da sub-bacia, onde a pluviometria é menor e o relevo é mais pediplanado.

**Figura 7** - Mapa de erosão potencial para a sub-bacia do rio Aracoiaba



**Fonte:** elaborado pelos autores (2023).

**Quadro 5** - Distribuição de classes de risco a erosão potencial

Classe de risco em t.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Área em hectares	Frequência em percentagem
Nulo a muito baixo (0 - 2)	917	1,56%
Baixo (2 - 4)	2.205	3,75%
Médio (4 - 6)	9.791	16,65%
Alto (6 - 20)	12.291	20,90%
Muito alto (>20)	33.603	57,14%
<b>Total</b>	<b>58.809 ha</b>	<b>100,00%</b>

**Fonte:** elaborado pelos autores (2023).

### Avaliação do assoreamento

Para estimar a produção média de sedimentos por assoreamento na sub-bacia (cenário 1), calculou-se a produção média de sedimentos baseada nas taxas de estimativa de produção de sedimentos (fator A) para todas as unidades de referência da bacia. Como a resolução espacial do *raster* do fator A é de 15 metros, considerou-se uma média entre as 39.206.000 unidades de área (em m<sup>2</sup>), indicando uma precisão na média, que, por fim, constatou uma taxa média de 9,027%, apresentando uma taxa inferior à média mundial que é de 10,000% (MORRIS *et al*, 2008). A taxa média indica, conseqüentemente, que do total erodido anualmente pela bacia (867.412,36 t/ano), aproximadamente 78.240 toneladas, em média, efetivamente também são captadas pela rede de drenagem.

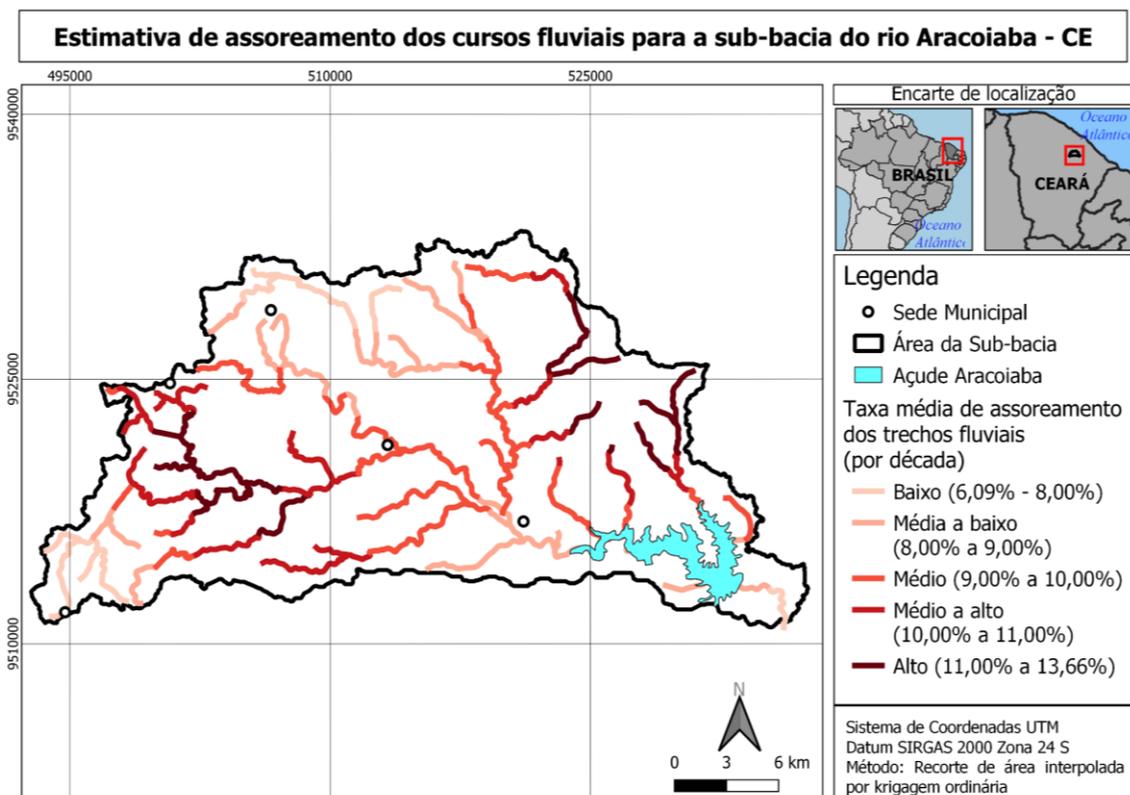
Apesar da taxa situar-se abaixo da média, ela ainda sim é um valor considerável. O volume assoreado pode provocar mudanças hidrológicas na sub-bacia em mais intensidade que o comum observado no semiárido, especialmente no que concerne aos riscos mediante eventos climáticos extremos. As conseqüências do assoreamento vão desde desvios nos cursos d'água devido ao alto índice de depósito de sedimentos no fundo do vale, onde o fluxo pode ser direcionado a áreas domiciliares, agrícolas ou pastoris, provocando aumento do risco hidrológico. Existe ainda uma maior facilidade no processo de risco de alagamento, devido a redução da profundidade fluvial entre os leitos e pode ser potencializada com a ausência de mata ciliar ou diques marginais.

As taxas simuladas de assoreamento dos cursos fluviais não são uniformes em todas as regiões, principalmente nas zonas de maior interesse hidrológico que são as calhas fluviais, e por isso

elaborou-se um segundo cenário de forma a analisar utilizando-se de 250 pontos amostrais ao longo dos tributários fluviais na forma de unidades estimadas amostrais de produção de sedimentos. Esta quantidade de amostras permite visualizar a variação espacial das taxas de sedimentação na escala da área de pesquisa e as áreas entre os pares de pontos amostrais foi simulada através de modelagem por interpolação de krigagem ordinária.

O mapa indicado na figura 8 demonstra o resultado da simulação da taxa de assoreamento dos cursos fluviais, observando-se que duas áreas, uma a nordeste outra no centro-sudoeste da sub-bacia são as regiões onde os níveis de assoreamento são mais intensos, chegando a índices de 13,66%. As áreas de alto índice de assoreamento atestam regiões onde há uma veloz redução na capacidade de armazenamento de reservatórios no futuro em relação ao atual e com mudanças hidrológicas dos cursos fluviais de forma acelerada. A retirada da cobertura vegetal, a dispersão de domicílios e a criação de regiões turísticas pode impactar ainda mais a produção de sedimentos para os tributários.

**Figura 8** - Mapa de estimativa de assoreamento.



**Fonte:** elaborado pelos autores (2023).

Explorando uma explicação para as altas taxas, um dos pressupostos está no uso e ocupação do solo. Os municípios de Aratuba e Mulungu (área centro-sudoeste) são os que possuem as maiores

taxas de população rural (67,31% e 63,45%, respectivamente), estando a população bem distribuída ao longo do município, isto implica em um maior quantitativo de estradas e de domicílios cuja as cercanias dos terrenos incrementam parcelas consideráveis de influência de solo exposto seja para quintais, entradas da casa, plantio, áreas de lazer etc. ocorrendo diretamente nas regiões protegidas do maciço do Baturité mas também no trecho subúmido (área Nordeste) que tem como ponto de referência o distrito de Antônio Diogo, Município de Redenção.

Já as regiões de menores valores de nível de assoreamento se localizam no alto curso das bacias próximo a cidade de Aratuba (sudoeste), próximo a cidade de Guaramiranga (noroeste) e um outro trecho se localiza próximo ao exultório da bacia onde os menores índices chegam a 6,09%. Os volumes de aumento dos índices de sedimentação nos setores delimitados podem estar relacionados com o baixo uso da terra ou baixo volume de retenção da água, seja por baixa pluviometria ou por baixo impacto direto pluviométrico sobre o solo, por influência da cobertura vegetal e por baixa energia de carreamento dos cursos hídricos. Pode-se acrescentar ainda a retenção de grande parte dos elementos sedimentados nos trechos à montante, o menor tempo de retenção da água nos reservatórios, o fato da área circundante possuir maior quantidade de solo coberto e a ausência de pluviometria no segundo semestre do ano, necessitando para a sua ponderação e mensuração, análises mais apuradas e complexas tais como análises hidrossedimentológicas.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O estudo de estimativa de produção de sedimentos permite auxiliar nas decisões do poder público municipal ou privado de forma a avaliar os impactos socioambientais provocados por erosão, principalmente utilizando-se do RUSLE, que avaliou de modo satisfatório o risco a erosão na bacia do rio Aracoiaba utilizando-se de um arcabouço de dados geográficos em face do emprego de cálculos simplificados no estudo e também indicando o quanto a cobertura do uso do solo na região é relevante para a redução dos processos de produção de sedimentos. Recomenda-se coletar dados de campo para que o modelo seja empregado de forma mais refinada e precisa.

A modelagem demonstrou ser superestimada, havendo um distanciamento entre os resultados na relação entre o fator A e a intensidade de assoreamento que se deve supostamente aos diferentes processos geoestatísticos e a falta de dados hidrossedimentológicos, além da falta de maiores levantamentos matemáticos e/ou possíveis inconsistências na medição, demonstrando um desafio na análise da avaliação dos processos erosivos.

Um dos impactos do excesso de produção de sedimentos é o assoreamento dos cursos fluviais que também é de grande interesse geográfico e paisagístico, desperta na população o reclame contra os problemas ambientais relacionados aos riscos a inundações e alagamentos e também estimula o planejamento ambiental municipal utilizando-se de técnicas como a dragagem, limpeza e desobstrução dos canais em função da regularização da vazão.

Portanto, enseja-se que a presente pesquisa contribua para a gestão dos recursos hídricos e naturais, pois a partir das conclusões obtidas é possível evidenciar as formas de manejo inadequado do solo e que potencializa o assoreamento dos rios. Recomenda-se ainda adotar medidas preventivas para diminuir as áreas com solo exposto e a instauração de medidas cautelares para fiscalizar as áreas de solo exposto e a criação de programas de recuperação de áreas sem cobertura vegetal, principalmente na APA do Maciço do Baturité, visando retardar os índices de assoreamento e de produção de sedimentos por erosão.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor; ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC); ao Laboratório de Climatologia Geográfica e Recursos Hídricos (LCGRH) do Departamento de Geografia da UFC, pela estrutura disponibilizada.

## REFERÊNCIAS

- AQUINO, C. M. S. de; OLIVEIRA, J. G. B. de; SALES, M. C. L. Estimativa da erosividade das chuvas (R) nas terras secas do Estado do Piauí. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza. v. 37, n. 3, p. 287–291, 2006.
- ARAÚJO, J. C. Assoreamento em reservatórios do semiárido: modelagem e validação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 39-52, 2003.
- BABA, R. K.; VAZ, M. S. M. G.; COSTA, J. da. Correção de dados agrometeorológicos utilizando métodos estatísticos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v. 29, n. 4, p. 515–526, jan. 2014.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2012. 360p.
- BORGES, K. M. R. *Avaliação da susceptibilidade erosiva da Bacia do Rio Carinhanha (MG/BA) por meio da EUPS - Equação Universal de Perda de Solos*. 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- BRANCO, N. *Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta*. 1998. 135 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1998.

CARVALHO, G. M. B. S.; VALÉRIO FILHO, M.; MEDEIROS, J. S. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento na identificação da erosão dos solos na bacia do Rio Aracoíaba – CE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7.; 1993, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: INPE/SBC, 1993, p. 188 - 198.

CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. 1. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

\_\_\_\_\_; FILIZOLA JUNIOR., SANTOS, P. M. C; LIMA, J. E. F. W. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília: ANEEL, 2000. 107 p.

CASSETI, V. *Ambiente e apropriação do relevo*. 2. ed. São Paulo: Contexto, 1995. 147 p.

CASTRO, T. M. de; ALAMINO, A. L. M.; ARAÚJO, R. R. de; NUNES, J. O. R.; TAVARES, C. R. G.; SOARES, P. F.; BASSANI, F.; TEIXEIRA, T. M. Perda de Solo Antes e Depois da Adequação em Estradas Não Pavimentadas. Estudo de caso: trecho da PSP-428 de Presidente Prudente - SP. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 18.; 2009, Campo Grande. Anais... Campo Grande: Acqua Consultoria, 2009, p. 1-20.

DEMARCHI, J. C. *Geotecnologias aplicadas à estimativa de perdas de solo por erosão hídrica na Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP*. 2012. 150 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; REICHERT, J. M.; MERTEN, G. H.; DALBIANCO, L.; BARROS, C. A. P.; RAMON, R. Impact of no-tillage agricultural systems on sediment yield in two large catchments in Southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, Berlim, v.14, n. 1, p. 1287-1297, 2014.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. D.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba - PI/MA. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 73-85, 2006.

FIORIO, P. R. *Avaliação cronológica do uso da terra e seu impacto no ambiente da microbacia hidrográfica do Córrego do Ceveiro da região de Piracicaba, SP*. 1998. 114 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). *Postos Pluviométricos*. Fortaleza, 2023. Disponível em: <[http://www.funceme.br/?page\\_id=2694](http://www.funceme.br/?page_id=2694)>. Acesso em: 25 fev. 2023.

GRAÇA, C. H.; PASSIG, F. H.; KELNIAR, A. R.; PIZA, M. A.; CARVALHO, K. Q.; ARANTES, E. J. Multitemporal analysis of estimated soil loss for the river Mourão watershed, Paraná-Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, São Carlos, v. 75, n. 4, p. 120-130, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual Técnico de Pedologia*. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

\_\_\_\_\_. *Informações ambientais de pedologia*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia.html>>. Acesso em: 11 abr. 2023.

JARDIM, A .M. R. F.; JUNIOR, G. M. A.; SILVA, M. J.; MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F. Estimativas de perda de solo por erosão hídrica para o município de Serra Talhada, PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, Recife, v.2, n.3, p.186-193, 2017.

KINNELL, P. I. A. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, v. 385, n. 1, p. 384-397, 2010.

MACEDO, F. L.; MÉLLO JÚNIOR, A. V.; MARCELLINI, S. S.; PEDROTTI, A. Modelagem da produção de sedimentos na sub-bacia hidrográfica do Riacho Jacaré - SE. *Revista Ra'e Ga - Espaço Geográfico em Análise*, Curitiba, v. 24, n.1, p. 272-289, 2012.

MAFRA, N. M. C. *Esquema metodológico para la planificación de usos del suelo em zonas tropicales húmedas: aplicación a la Region Norte del Estado del Rio de Janeiro*. 1997, 229 f. Tese (Doutorado em Edafologia) - Universitat de València. Facultat de Geografia e Historia, València, 1997.

MORGAN, R. P. C. *Soil Erosion and Conservation*. 3. ed. Malden: Blackwell Publishing Ltd, 2005. 320 p.

MORRIS, G. L.; ANNANDALE, G.; HOTCHKISS, R. Reservoir Sedimentation. In: GARCIA, M. H. (Org.) *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice*. Reston (Virgínia): ASCE Manual of Practice 110 - American Society of Civil Engineers. 2008. p. 579-612.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. A.; WEESIES, G. A.; McCOLL, D. K. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington: USDA, 1997. 407 p.

SARTORI, A.; NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro, v.10, n.4, p.5-18, 2005.

SILVA, F. G. B.; MINOTTI, R. T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. Predição da perda de solo na Fazenda Canchim – SP utilizando Geoprocessamento e o USLE 2D. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p.141-148, 2010.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). *National Engineering Handbook: Section 4, Hydrology*. Washington: USDA, 1972. 127 p.

SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Identificação de áreas com perda de solo acima do tolerável usando NDVI para o cálculo do fator C da USLE. *Revista Ra'e Ga - Espaço Geográfico em Análise*, Curitiba, v. 42, n.1, p. 72-85, 2017.

STEIN, D. P.; DONZELLI, P. L.; GIMENEZ, A. F.; PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de

erosão laminar, natural e antrópica, na Bacia do Peixe Paranapanema. In: *SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO*, 3.; 1987, Marília. Anais... São Paulo: ABGE/DAEE, 1987, p. 105-135.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 12.; 2005, Goiânia. Anais... Goiânia: Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005. p. 1-8.

WALLING, D. E. The Sediment Delivery Problem. *Journal of Hydrology*, Wellington, v. 65, n.1-3, p. 209-237, 1983.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Washington: USDA, 1978. 67 p.