



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

RAIONARA DANTAS FONSECA

ESTIMATIVA DO POTENCIAL NATURAL DE EROSÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DE CONTRIBUIÇÃO DO RESERVATÓRIO DE
UMARI-RN

MOSSORÓ

2024

RAIONARA DANTAS FONSECA

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL NATURAL DE EROSÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DE CONTRIBUIÇÃO DO RESERVATÓRIO DE UMARI-RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo de Solo e Água

Orientador: Luis César de Aquino Lemos Filho, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

FF676 Fonseca, Raionara Dantas .
e Estimativa do potencial natural de erosão na
bacia hidrográfica de contribuição do reservatório
de Umari-RN / Raionara Dantas Fonseca. - 2024.
66 f. : il.

Orientador: Luis César de Aquino Lemos Filho.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2024.

1. EUPS. 2. geoprocessamento. 3. potencial
erosivo. 4. recursos hídricos. I. Lemos Filho,
Luis César de Aquino, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ESTIMATIVA DO POTENCIAL NATURAL DE EROSÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DE CONTRIBUIÇÃO DO RESERVATÓRIO DE UMARI-RN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo de Solo e Água

Defendida em: 25/08/ 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **LUIS CESAR DE AQUINO LEMOS FILHO**
Data: 02/05/2024 20:25:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luis César de Aquino Lemos Filho, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **JOAQUIM ODILON PEREIRA**
Data: 03/05/2024 08:14:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Joaquim Odilon Pereira, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **MARIANA BERALDO MASUTTI**
Data: 03/05/2024 11:06:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mariana Beraldo Masutti, Dra. (CPEA)
Membro Examinador Externo

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL OLIVEIRA BATISTA**
Data: 02/05/2024 14:54:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rafael Oliveira Batista, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

*À minha avó, Expedita Fonseca (In
Memoriam), que mesmo ausente,
se faz presente.*

*Em especial aos meus pais,
José Erivan e Maria Rosidete.
Ao meu marido, Antônio Eduardo.
Por fim, aos meus irmãos
Ana Raquel, Antônio Railson e sobrinhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, por sua infinita graça, bondade e misericórdia, pois sem Ele jamais teria chegado aonde cheguei.

Agradeço ao meu esposo Eduardo pelo companheirismo, confiança, todo o apoio e paciência.

Agradeço aos meus pais, Maria Rosidete e José Erivan, que me apoiaram e tem todo orgulho de mim, por serem minha base e minha inspiração.

Aos meus irmãos, Ana Raquel e Railson, juntamente com meus sobrinhos que fazem a minha alegria.

Aos meus amigos que, mesmo estando distantes fisicamente, não deixaram de ajudar como podiam, em especial aos meus colegas de curso e de trabalho (Laiz e Bruno), que me acolheram quando precisei e me ajudaram com conhecimentos e palavras amigas.

Agradeço ao meu orientador Prof. Luis César, pela oportunidade de participar desse projeto e pelos ensinamentos no período de orientação.

À banca examinadora, pela disponibilidade e contribuição para com meu trabalho.

“Àquele que é capaz de fazer infinitamente mais do que tudo o que pedimos ou pensamos, de acordo com o seu poder que atua em nós.” *Efésios 3:20*

RESUMO

A erosão do solo é um sério problema ambiental em regiões com influência antrópica e gestão agrícola inadequada. No estado do Rio Grande do Norte (RN), o clima semiárido, a topografia acidentada e práticas humanas inadequadas intensificam a erosão hídrica, principalmente em áreas agrícolas. A erosão causa perda de solo fértil, contaminação de rios, assoreamento de corpos d'água e aumenta os riscos de enchentes. O presente estudo se concentra na estimativa do potencial natural de erosão da Bacia Hidrográfica de contribuição do reservatório de Umari-RN. Essa bacia apresenta problemas de erosão e assoreamento, afetando a qualidade ambiental e a produção local. Para estimar o potencial de erosão, foram aplicados modelos matemáticos considerando mudanças no uso da terra na bacia. O estudo visa a caracterizar a bacia, avaliar a dinâmica de erosão e a perda de solos por meio da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) e do Sistema de Informações Geográficas (SIG). Isso possibilita o planejamento ambiental e a implantação de práticas de conservação do solo e água na região em estudo. Os resultados encontrados mostram que a bacia de contribuição do reservatório Umari apresenta formato alongado, baixa tendência a enchentes e cheias grandes e é classificada como de 6ª ordem, bem ramificada. Essas características favorecem a conservação e preservação da bacia. O uso do SIG, especificamente o QGIS, para mapear perda de solo, mostrou-se eficiente para estimar a erosão laminar em grandes áreas. A perda média anual de solo na área estudada variou entre 10 e 15,0 t ha⁻¹ ano⁻¹. A presença de solo exposto revelou práticas agropecuárias inadequadas, aumentando o risco de assoreamento. Esses resultados embasam o planejamento ambiental e a gestão de recursos hídricos. Levando em conta a perda média anual de solo, a estimativa da vida útil do reservatório foi de aproximadamente 295 anos desde a sua construção, restando atualmente cerca de 275 anos. O estudo mostrou-se eficaz na obtenção de informações relevantes para o gerenciamento do reservatório e da bacia de contribuição, auxiliando na conservação do solo, na preservação dos recursos hídricos e na adoção de práticas sustentáveis na região estudada.

Palavras-chave: EUPS; geoprocessamento; potencial erosivo; recursos hídricos.

ABSTRACT

Soil erosion is a significant environmental issue in regions with anthropogenic influence and inadequate agricultural management. In the State of Rio Grande do Norte (RN), the semi-arid climate, rugged topography, and improper human practices intensify water erosion, particularly in agricultural areas. Erosion leads to loss of fertile soil, river contamination, water bodies' siltation, and increased flood risks. The present study focuses on estimating the natural erosion potential of the contributing watershed of Umari-RN reservoir. This watershed exhibits erosion and siltation issues, impacting environmental quality and local production. To estimate erosion potential, mathematical models considering land use changes in the watershed were applied. The study aims to characterize the watershed, assess erosion dynamics and soil loss using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geographic Information System (GIS). This enables environmental planning and implementation of soil and water conservation practices in the studied region. The findings reveal that the contributing watershed of Umari reservoir has an elongated shape, low susceptibility to floods and large inundations, and is classified as a 6th order, well-branched system. These characteristics favor conservation and preservation of the watershed. The use of GIS, specifically QGIS, for soil loss mapping, proved to be efficient in estimating sheet erosion in large areas. The average annual soil loss in the studied area ranged from 10 to 15.0 t ha⁻¹ year⁻¹. The presence of exposed soil suggested inadequate agricultural practices, increasing the risk of siltation. These results support environmental planning and water resource management. Considering the average annual soil loss, the estimated lifespan of the reservoir was approximately 295 years since its construction, with about 275 years remaining. The study proved to be effective in obtaining relevant information for reservoir and watershed management, aiding in soil conservation, water resource preservation, and the adoption of sustainable practices in the studied region.

Keywords: USLE; geoprocessing; water resources; erosive potential.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da bacia de contribuição do reservatório Umari-RN.....	25
Figura 2. Mosaico Topodata com folhas que abrangem a área de estudo.....	27
Figura 3. Declividade na área da bacia de contribuição do reservatório Umari-RN.....	43
Figura 4. Perfil hipsométrico do curso d'água principal da bacia de contribuição do reservatório Umari, Rio Grande do Norte.....	46
Figura 5. Tipos de solo na área da bacia de contribuição do reservatório Umari-RN.....	47
Figura 6. Mapa de precipitação pluviométrica da área de estudo.....	48
Figura 7. Mapa de uso e cobertura do solo.....	49
Figura 8. Mapa de relevo da área de estudo.....	49
Figura 9. Fator LS (comprimento de rampa e declividade).....	50
Figura 10. Fator K (erodibilidade do solo).....	52
Figura 11. Fator R (erosividade das chuvas).....	53
Figura 12. Fator CP (cobertura da terra e práticas conservacionistas).....	54
Figura 13. Fator A (perda média de solo).....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Normal climatológica mensal da bacia de contribuição do reservatório (2001-2021.).....47

Gráfico 2. Precipitação total anual (2001-2021).....48

LISTA DE QUADROS

Quadro 01. Parâmetros morfométricos e equações para cálculos da bacia de contribuição
do reservatório Umari-RN.30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Percentual dos municípios que compõem a bacia de contribuição do reservatório Umari-RN.....	26
Tabela 2. Classificação da declividade.....	32
Tabela 3. Estações pluviométricas.....	34
Tabela 4. Classificação do Fator K para diferentes solos.....	35
Tabela 5. Classificação do Fator K para diferentes solos.....	36
Tabela 6. Classificação do fator LS.....	37
Tabela 7. Valores aproximados de C e P.....	38
Tabela 8. Classes de perda de solo.....	39
Tabela 9. Valores de tolerância de perda de solos utilizados.....	40
Tabela 10. Características morfométricas da bacia de contribuição do reservatório Umari, Rio Grande do Norte.....	42
Tabela 11. Áreas das classes de solo.....	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Análises morfométricas	17
2.2 Caracterizações dos solos	18
2.3 Análises do aporte de sedimentos	18
2.3.1 Produção de sedimento em bacia hidrográfica.....	18
2.3.2 Erosão.....	19
2.3.3 Fatores que influenciam a erosão	20
2.3.4 Equação Universal de Perda de Solo.....	21
2.3.5 Taxa de transferência de sedimentos (SDR).....	22
2.4 Avaliações do processo de assoreamento.....	22
2.5 Previsão da vida útil.....	23
2.6 Utilização de SIG no estudo de erosão	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Área de estudo	25
3.2 Sistema de Informação Geográfica (SIG).....	26
3.3 Delimitação da área de estudo	26
3.4 Caracterizações morfométricas da área de estudo	27
3.5 Aquisição e processamento de imagens.....	31
3.6 Elaboração de cartas temáticas e caracterização geoambiental da área de estudo	
3.6.1 Carta hidrográfica.....	31
3.6.2 Cartas de hipsometria e declividade	31
3.6.3 Carta de solos	32
3.6.4 Carta de pluviosidade	32
3.6.5 Mapeamento de uso e cobertura da terra.....	32

3.7 Determinação da estimativa de perda de solos através da por meio da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS).....	33
3.7.1 Fator erosividade da chuva (R)	33
3.7.2 Fator erodibilidade dos solos (K)	34
3.7.3 Fator comprimento de rampa e declividade (LS).....	36
3.7.4 Fator da forma de uso e cobertura da terra (C) e fator das práticas conservacionistas (P).....	38
3.7.5 Fator A - perda média anual de solo	38
3.8 Tolerância de perda de solos (T) e vida útil do reservatório.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 Caracterização morfométrica da área de estudo	41
4.2 Caracterização geoambiental da área de estudo.....	42
4.3 Cartas dos fatores da EUPS (R, K, LS e CP)	50
4.4 Perda de solo média	54
4.5 Vida útil do reservatório	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo é identificada há muito tempo como um problema ambiental sério, sobretudo em regiões onde ocorrem influência antrópica e gestão agrícola sem critérios apropriados (Avanzi, 2005; Jorge, 1986; Matos, 2015). Tal fenômeno possui potencial de alcançar diversas áreas, como, por exemplo, centros urbanos, áreas naturais e regiões agrícolas.

No estado do Rio Grande do Norte (RN), devido ao clima semiárido, caracterizado por chuvas irregulares e concentradas em poucos meses do ano, a vegetação nativa é adaptada a essas condições, o que torna o solo mais suscetível à erosão quando exposto a eventos de precipitação mais intensos, de modo que a combinação de fatores naturais, como a topografia acidentada, a escassez de cobertura vegetal e as chuvas torrenciais, juntamente com práticas humanas inadequadas, como desmatamento, agricultura inadequada e pastoreio excessivo, intensifica a erosão hídrica em várias áreas do estado, principalmente em áreas agrícolas (Silva, Gomes, Sá, 2004).

Nesse contexto, diversos estudos foram conduzidos para avaliar a extensão da erosão hídrica no Rio Grande do Norte e seus impactos ambientais e socioeconômicos. Dentre os principais problemas associados à erosão hídrica no estado, destacam-se a perda de solo fértil, a contaminação de rios e mananciais, o assoreamento de corpos d'água e o aumento dos riscos de enchentes em algumas regiões. A erosão representa um amplo dano ambiental e econômico (Lepsc, 2010).

O solo é um recurso indispensável para a qualidade de vida do homem e sobrevivência dos seres vivos, destacando-se dentre suas funções diretas e indiretas a produção de alimentos e a regularização do clima (Bertol *et al.*, 2016). Acontecimentos naturais, como processos erosivos, incidem diretamente sobre os solos e rochas para transformação do relevo da terra, causando a perda desse recurso.

importância social e econômica para a região em estudo. Além disso, cabe mencionar que a respectiva bacia de contribuição do reservatório de Umari pode ser considerada representativa das condições existentes na Bacia Apodi-Mossoró.

Dentre as razões para a seleção desta bacia, pode-se destacar: a) evidências de processos erosivos; b) presença de um reservatório possibilitando estudos de assoreamento; c) potencialidade desta bacia como manancial hídrico para diversas cidades da região. Nessa bacia, alguns dos maiores problemas relacionados ao meio físico estão associados principalmente aos processos erosivos e ao assoreamento de rios e reservatório.

A erosão pode colocar em risco a qualidade ambiental, afetar a produção de alimentos e atividades agropecuárias locais e, conseqüentemente, promover a perda de fertilidade do solo e o assoreamento dos cursos d'água. Apesar da importância desta demanda, não existem estudos abordando, de maneira abrangente, os processos erosivos de vertentes, o transporte e deposição de sedimentos em corpos de água. Diante disto, este estudo buscou utilizar métodos que apontassem a fragilidade e a vulnerabilidade da bacia aos processos erosivos estimando taxas de perda de solo e avaliando a produção de sedimentos em um pequeno reservatório.

Para a estimativa do potencial natural de erosão da bacia hidrográfica selecionada, foi essencial a aplicação de modelos matemáticos que contemplam o impacto das mudanças de uso da terra nos padrões de erosão na bacia de contribuição do reservatório.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar morfometricamente a bacia de contribuição do reservatório Umari, no Rio Grande do Norte, e avaliar sua dinâmica de erosão hídrica e estimar a vida útil desse reservatório, a partir de uma análise quantitativa de perda de solos, realizada por meio da aplicação da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) e do Sistema de Informações Geográficas (SIG), permitindo, assim, a compreensão da relação entre o fenômeno de erosão e suas causas, favorecendo o planejamento ambiental, o gerenciamento de reservatórios e a implantação de práticas e manejos que favoreçam a conservação do solo e da água da região em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Análises morfométricas

A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um procedimento executado nas análises hidrológicas e/ou ambientais, tendo como objetivos estudar e analisar as características geométricas e topográficas que definem a forma e o comportamento do sistema de drenagem da bacia. Essa análise é fundamental para entender a dinâmica da bacia e é uma etapa importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos, pois fornece informações cruciais para avaliar a suscetibilidade a processos erosivos, enchentes, assoreamento, dentre outros aspectos. As principais medidas incluem área, perímetro, comprimento do canal principal, densidade de drenagem, hierarquia dos rios, índices de forma, declividade média e altitude máxima e mínima (Fraga *et al.*, 2014).

A bacia hidrográfica é a unidade a ser analisada para avaliar os efeitos dos sistemas de manejo do solo a qualidade e quantidade de material descartado durante eventos erosivos (Alvarez *et al.*, 2014). O manejo inadequado do solo favorece o transporte de sedimentos, nutrientes e matéria orgânica pela erosão hídrica, até atingir as áreas de recarga de uma bacia hidrográfica. Este fato pode desencadear uma série de problemas econômicos e ambientais, redução da produtividade agrícola, além de impactar na qualidade do abastecimento de água (Bispo *et al.*, 2017).

Segundo Lima (2008), o comportamento hidrológico de uma bacia está relacionado às características geomorfológicas, como a forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo e o tipo de cobertura vegetal da área. Estas características físicas e bióticas são importantes para o ciclo hidrológico, pois influenciam na infiltração de água no solo, na quantidade de água no deflúvio, na evapotranspiração e no escoamento superficial (Teodoro *et al.*, 2007).

Neste contexto, a caracterização morfométrica de bacias hidrográficas analisa quantitativamente esses aspectos, estabelecendo um procedimento comum para a concretização de análises hidrológicas ou ambientais, no intuito de esclarecer questões diretamente relacionadas à compreensão da dinâmica ambiental, de forma regional ou local (Teodoro *et al.*, 2007; Tonello *et al.*, 2006). Portanto, a análise morfométrica contempla alguns parâmetros calculados, tais como: densidade de drenagem, declividade, comprimento de cursos d'água, coeficiente de compacidade, fator de forma, índice de circularidade, dentre outros (Antoneli; Thomaz, 2007; Cardoso *et al.* 2006).

2.2 Caracterizações dos solos

A caracterização do solo é um processo essencial para entender suas propriedades físicas, químicas e biológicas, permitindo a identificação das características do solo, sua aptidão agrícola, avaliação de potenciais riscos ambientais e a adoção de práticas de manejo adequadas. É uma ferramenta valiosa para tomada de decisões em diversos setores, como agricultura, engenharia civil, conservação de recursos naturais e planejamento urbano. Está diretamente relacionada à erosão, uma vez que as propriedades e características do solo desempenham papel fundamental na suscetibilidade à erosão hídrica e eólica.

Conforme destacado por Ghazavi et al. (2020), a caracterização detalhada do solo é crucial para entender a dinâmica da erosão, pois as características físicas e químicas do solo afetam diretamente a taxa de infiltração da água e a estabilidade das partículas do solo. A presença de cobertura vegetal é outro aspecto importante relacionado à caracterização do solo e à erosão. Conforme mencionado por Debaene-Gill et al. (2021), a vegetação atua como barreira física que protege o solo dos impactos diretos da chuva e reduz a velocidade do escoamento superficial, diminuindo o risco de erosão hídrica.

A caracterização do solo é fundamental para identificar áreas mais vulneráveis à erosão e implementar práticas de manejo adequadas para prevenir e controlar esse processo. De acordo com Oliveira, Norton e Silva (2019), o conhecimento das características do solo permite a adoção de medidas específicas de conservação do solo, como o plantio em curvas de nível, a construção de terraços e o plantio direto, contribuindo para a redução da erosão hídrica.

2.3 Análises do aporte de sedimentos

2.3.1 Produção de sedimento em bacia hidrográfica

Segundo Guerra (2005), a primeira etapa da erosão ocorre quando as partículas do solo se desagregam devido à pluviosidade. A maneira como as chuvas são distribuídas espacialmente e ao longo do tempo, bem como sua intensidade, desempenham papel fundamental no processo erosivo. Além da pluviosidade, a erosão é influenciada por vários fatores, além da pluviosidade, o escoamento superficial, a cobertura vegetal, o uso do solo, a topografia, a rede de drenagem e as características dos sedimentos presentes.

Embora a produção de sedimentos seja um fenômeno natural relacionado ao intemperismo e erosão, a interferência humana no ambiente pode aumentar essa produção,

como ocorre em situações de construção de barragens, desenvolvimento urbano e canalização de rios. No entanto, nem todo o sedimento gerado em uma bacia hidrográfica alcança os canais fluviais: parte dele pode ser armazenada na forma de colúvio na planície de inundação, nos terraços, nos diques e no próprio leito do rio (Kirkby, 1990; Paiva, 2003).

O processo de transporte e deposição de sedimentos gera diversas consequências, como transporte de poluentes associados ou não às partículas, degradação da qualidade da água destinada ao consumo humano, desequilíbrio dos ecossistemas devido à turbidez, assoreamento de reservatórios e mudanças na geometria dos canais fluviais. Esses problemas têm impacto significativo no meio ambiente e na sociedade, tornando essencial que o planejamento das bacias hidrográficas considere também a dinâmica hidrossedimentológica (Christofolletti, 1995; Kirkby, 1980; Silva et al., 2004).

Desde a década de 1960, diversos pesquisadores têm ampliado seus estudos, propondo modelos matemáticos para avaliar e prever os processos erosivos e a quantidade de sedimentos produzidos em uma área específica, em diferentes escalas de análise (Jansen; Painter, 1974; Williams, 1990; Wischmeier; Smith, 1965). No Brasil, o uso de modelos matemáticos no estudo dos processos erosivos é comum, como evidenciado nos trabalhos de Farinasso *et al.* (2006), Machado e Vettorazzi (2003), Mata *et al.* (2007), Prado e Nobrega (2005).

2.3.2 Erosão

Os processos erosivos podem ser traduzidos como a desagregação, transporte e deposição de partículas do solo pelas águas, ventos ou geleiras, tendo a erosão hídrica maior destaque devido ao seu alcance (Araujo; Almeida; Guerra, 2013; Bertoni; Lombardi Neto, 1999). A erosão hídrica, em particular, é um dos principais tipos de erosão causados pela água das chuvas. Quando a chuva atinge o solo, a água pode se acumular em pequenas depressões, formando enxurradas que ganham força à medida que se movem pelo terreno, carregando partículas do solo consigo. Com o tempo, essa ação pode causar sulcos e voçorocas no solo, resultando na perda de terra arável e diminuição da capacidade de retenção de água. Dentre as consequências negativas, tem-se a degradação da qualidade do solo, pois as camadas férteis são removidas, afetando negativamente a produção agrícola e pecuária. Além disso, o solo transportado pela erosão pode contaminar rios e corpos d'água, resultando em assoreamento e redução da qualidade da água. O assoreamento também pode levar à redução da capacidade de armazenamento de água em reservatórios e agravar os riscos de enchentes.

Quanto mais sedimento é conduzido para dentro do espelho d'água, menor será o tempo

de vida útil do reservatório, deste modo, as previsões das taxas e da produção de sedimentos nas bacias hidrográficas são de suma importância (Lemos; Bahia, 1992). Atualmente, o processo erosivo vem sendo acelerado devido à exploração do homem sobre a natureza. Tal fato ocorre principalmente a partir da movimentação dos solos com aração e retirada da vegetação protetora.

2.3.3 Fatores que influenciam a erosão

A erosão é influenciada por uma série de fatores que podem atuar isoladamente ou em conjunto para acelerar ou retardar o processo. Alguns dos principais fatores que influenciam na erosão incluem:

- a. Tipo de solo e sua resistência: Solos mais arenosos ou com baixa coesão tendem a ser mais suscetíveis à erosão, uma vez que suas partículas são facilmente desagregadas pela ação da água e do vento (Ghazavi *et al.*, 2020).
- b. Cobertura vegetal: A presença de vegetação é essencial para proteger o solo da ação direta da chuva e do vento. Áreas com vegetação densa apresentam menor risco de erosão em comparação com áreas desmatadas ou com pouca cobertura vegetal (Govers *et al.*, 2007).
- c. Declividade do terreno: A inclinação do terreno é um fator importante na erosão hídrica, pois terrenos mais íngremes tendem a ter maior escoamento superficial e, portanto, maior risco de erosão (Wischmeier; Smith, 1978).
- d. Intensidade e duração das chuvas: Chuvas de alta intensidade e longa duração podem aumentar significativamente a erosão, pois causam maior escoamento superficial e maior impacto das gotas de chuva no solo (Li *et al.*, 2019).
- e. Práticas de manejo do solo: O uso inadequado do solo, como aração em curvas de nível, monoculturas sem rotação de culturas e pastoreio excessivo, pode aumentar a erosão hídrica e eólica (Montgomery, 2007).
- f. Uso e ocupação do solo: Áreas urbanizadas e desmatadas para fins agrícolas ou industriais são mais vulneráveis à erosão devido à remoção da vegetação natural e à alteração das características do solo (Govers *et al.*, 2003).
- g. Efeito das atividades humanas: Ações humanas como: construção de estradas, mineração, desmatamento e expansão urbana, podem acelerar o processo de erosão e levar à degradação ambiental (Panagos *et al.*, 2015).

Esses fatores interagem de forma complexa e variam de acordo com as condições específicas de cada área. Para compreender plenamente o processo de erosão e implementar medidas eficazes de prevenção e controle, é fundamental considerar todos esses fatores em conjunto.

2.3.4 Equação Universal de Perda de Solo

A Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) tem sido aplicada em larga escala e em diversas regiões, bem como em bacias hidrográficas de diferentes dimensões (Costa *et al.*, 2016; Farhan; Nawaiseh, 2015; Karamesouti *et al.*, 2016; Nery; Lima, 2013). É um modelo amplamente utilizado para estimar a erosão hídrica em áreas agrícolas. Foi desenvolvida nos Estados Unidos em 1965 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em parceria com pesquisadores e engenheiros para auxiliar no planejamento de práticas de conservação do solo.

Segundo Paranhos Filho *et al.* (2003), a EUPS é um importante instrumento de investigação do processo erosivo utilizado no mundo todo, pois, a partir do conhecimento das características e propriedades dos fatores ambientais responsáveis pelas perdas de solos, são possíveis ações mais efetivas de planejamento ambiental, conservação e otimização dos recursos naturais. A modelagem matemática é uma importante ferramenta no desenvolvimento de avaliações confiáveis nas previsões de perda de solo, além de colaborar no planejamento de medidas de controle do fenômeno erosão.

A EUPS é uma equação empírica que leva em consideração vários fatores que influenciam a erosão, como a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, o comprimento da vertente, a declividade do terreno, a cobertura vegetal e as práticas de manejo do solo. A equação é representada por: $A = R \times K \times LS \times C \times P$, onde: A representa a perda de solo em toneladas por hectare por ano (t/ha/ano); R é o fator de erosividade da chuva, que leva em consideração a intensidade e a distribuição temporal das chuvas na área em estudo; K é o fator de erodibilidade do solo, que considera a suscetibilidade do solo à erosão, levando em conta suas características físicas, químicas e biológicas; LS é o fator topográfico, que leva em conta a interação entre o comprimento da vertente e a declividade do terreno; C é o fator de cobertura vegetal, que avalia o efeito da presença ou ausência de vegetação na redução da erosão; P é o fator de práticas de manejo, que considera a influência das práticas agrícolas no controle da erosão.

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) também é um importante instrumento de

quantificação e qualificação da perda de solo por erosão hídrica. De acordo com Mingoti (2009), o SIG, além de ser um sistema de apresentação e processamento de dados, é uma ferramenta capaz de realizar operações analíticas, sobreposição e cruzamento de informações, permitindo, assim, a análise e modelagem de informações espacialmente distribuídas.

2.3.5 Taxa de transferência de sedimentos (SDR)

A Taxa de Transferência de Sedimentos (SDR - *Sediment Delivery Ratio*) é definida como “a fração da carga de sedimentos produzidos em uma bacia hidrográfica que alcança um ponto de saída” (Favis-Mortlock; Boardman, 1995). Em outras palavras, a SDR representa a proporção desedimentos que efetivamente é transportada desde a área de origem, onde ocorre a erosão, até um ponto de saída, como um rio ou lago.

A SDR é influenciada por diversos fatores, como a erosividade das chuvas, a erodibilidade do solo, a cobertura vegetal, o comprimento da vertente e a conectividade hidrológica da bacia (Croke *et al.*, 2005). A estimativa da SDR é geralmente realizada por meio de modelos matemáticos, como o modelo SDR de Williams, Boardman e O'connor (2000), que consideram esses fatores para calcular a fração de sedimentos que é transferida para os canais fluviais. A compreensão da SDR é crucial para o manejo dos recursos hídricos e para o desenvolvimento de estratégias de controle da erosão e do transporte de sedimentos em bacias hidrográficas.

2.4 Avaliações do processo de assoreamento

O assoreamento é um fenômeno natural e, ao mesmo tempo, uma das principais consequências da intensificação das atividades humanas nas bacias hidrográficas. A sedimentação excessiva em corpos d'água, como rios, lagos e reservatórios, provoca sérios impactos ambientais e socioeconômicos. Para compreender e avaliar adequadamente o processo de assoreamento, são utilizadas diversas técnicas e ferramentas de estudo. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, como imagens de satélite e fotografias aéreas, possibilita a identificação de áreas suscetíveis ao assoreamento e a análise da evolução do fenômeno ao longo do tempo. Essas ferramentas são valiosas para o monitoramento e o planejamento de ações de controle (Basso *et al.*, 2016). Modelos matemáticos também desempenham papel importante na avaliação do processo de assoreamento, pois permitem simular a dinâmica da sedimentação em bacias hidrográficas e corpos d'água, fornecendo

informações valiosas para a tomada de decisões (Rinaldi *et al.*, 2016). A fim de compreender e antecipar a magnitude dos processos erosivos, vários estudiosos se dedicaram à criação de métodos empíricos que se fundamentam em parâmetros físicos e ambientais. Dentre essas metodologias, destaca-se a Equação Universal de Perdas de Solos (EUPS), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978).

A avaliação do processo de assoreamento é fundamental para entender seus impactos ambientais, econômicos e sociais, além de auxiliar no desenvolvimento de estratégias de manejo e conservação para mitigar os efeitos negativos desse fenômeno.

2.5 Previsão da vida útil

A previsão de vida útil de um reservatório está intimamente relacionada aos processos de erosão que ocorrem em sua bacia hidrográfica de contribuição. O acúmulo de sedimentos no reservatório, decorrente da erosão nas áreas circundantes, pode levar à redução da capacidade de armazenamento de água ao longo do tempo. Esse fenômeno é conhecido como assoreamento do reservatório e pode comprometer sua funcionalidade e vida útil. A erosão nas áreas de drenagem da bacia hidrográfica é a principal fonte de sedimentos que chegam ao reservatório. Práticas inadequadas de manejo do solo, como desmatamento, agricultura intensiva, urbanização desordenada e falta de medidas de conservação podem acelerar os processos erosivos e aumentar a taxa de sedimentação no reservatório (Li *et al.*, 2016).

A fim de prever a vida útil de um reservatório, é necessário realizar estudos para quantificar a taxa de sedimentação ao longo do tempo, amplamente utilizados para simular o transporte de sedimentos e a acumulação no reservatório (Zhang *et al.*, 2018). A implementação de práticas de manejo sustentável nas áreas de drenagem é fundamental para mitigar os processos erosivos e prolongar a vida útil dos reservatórios. A adoção de medidas de conservação do solo, reflorestamento de áreas degradadas, controle do uso do solo e implantação de práticas agrícolas sustentáveis são estratégias importantes para reduzir a erosão e, consequentemente, a sedimentação nos reservatórios (Deshmukh *et al.*, 2017).

2.6 Utilização de SIG no estudo de erosão

A utilização de SIG desempenha papel fundamental na compreensão e mitigação da erosão em bacias hidrográficas. A erosão do solo é uma preocupação ambiental significativa, e os SIG fornecem uma abordagem integrada para analisar os fatores que contribuem para esse

processo complexo. Diversos estudos têm demonstrado a eficácia dos SIG na análise da erosão de bacias, permitindo avaliação mais precisa dos riscos e desenvolvimento de estratégias de conservação.

Os SIG possibilitam uma análise espacial detalhada, integrando dados geográficos como topografia, uso da terra, cobertura vegetal e padrões de precipitação (Ceballos *et al.*, 2016). Isso permite a identificação de áreas propensas à erosão e a análise das interações entre fatores físicos e antrópicos que influenciam o processo erosivo (Mitasova *et al.*, 2013).

A modelagem de processos de erosão é outra área em que os SIG têm se destacado. Modelos como a EUPS são frequentemente implementados em SIG para estimar a taxa de erosão em diferentes partes de uma bacia (Renard *et al.*, 1997). Esses modelos consideram fatores como declividade do terreno, cobertura vegetal e práticas agrícolas, auxiliando na identificação de áreas críticas (Montgomery *et al.*, 2014). A análise temporal também é aprimorada com o uso de SIG. Por meio da comparação de imagens de satélite ao longo do tempo, é possível monitorar as mudanças na paisagem e quantificar a evolução da erosão (Mertens *et al.*, 2016), o que é crucial para avaliar a eficácia das estratégias de mitigação e adaptá-las aos planos de conservação conforme necessário.

Um exemplo notável é o estudo de Cai *et al.* (2018), que utilizou SIG para analisar a erosão na Bacia do Rio Yangtzé, na China. Os autores integraram dados topográficos, de uso da terra e de precipitação em um SIG, gerando mapas de risco de erosão que serviram como base para a tomada de decisões de políticas públicas. No Brasil, Brito *et al.* (1998) conduziram uma avaliação das perdas de solo por erosão em uma região de menor escala em Minas Gerais, empregando tanto a EUPS quanto o SIG. Utilizando métodos de geoprocessamento, os pesquisadores determinaram as taxas de perda de solo na área estudada, sugerindo que a sustentabilidade ambiental da microbacia não estava comprometida e destacando o valor significativo do SIG na fusão de dados de perda de solo por erosão, bem como na produção de mapas que permitam a avaliação e monitoramento contínuos da sustentabilidade ambiental.

Em suma, a aplicação de SIG na análise da erosão de bacias hidrográficas oferece abordagem abrangente e precisa para entender os processos erosivos. Essa abordagem possibilita a identificação de áreas de risco, a modelagem de processos complexos e o monitoramento contínuo das mudanças na paisagem. Com isso, o SIG desempenha papel crucial na formulação de estratégias eficazes de conservação do solo e dos recursos hídricos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

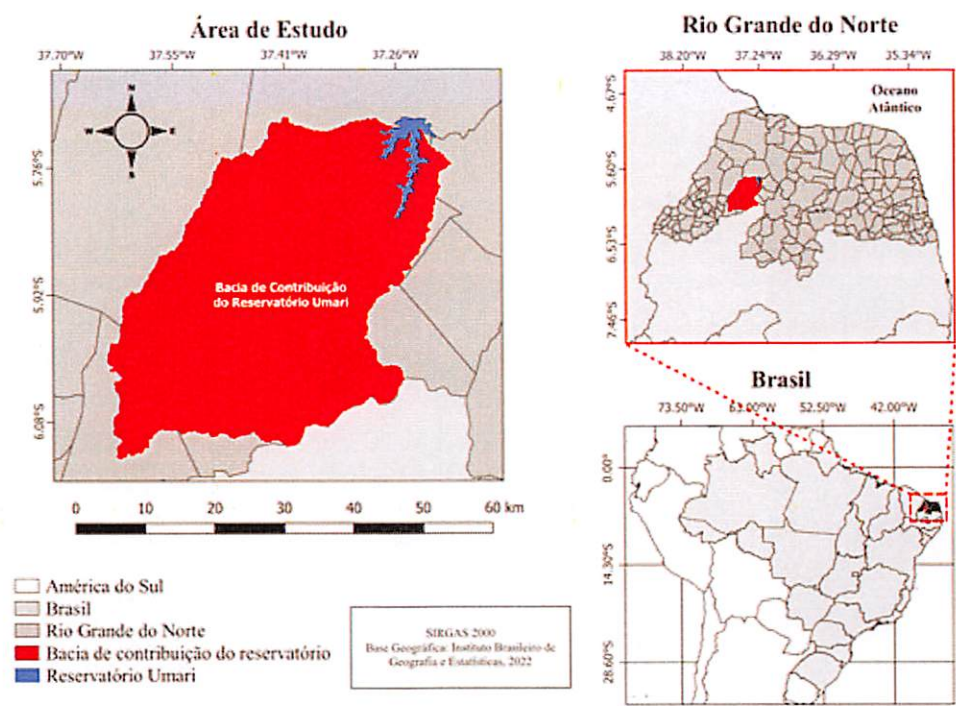
Para avaliar preliminarmente o grau de assoreamento do reservatório em estudo, foi realizado levantamento das suas características morfométricas. Em seguida, por meio da aplicação da EUPS, foi realizado estudo dos parâmetros necessários para estimar a perda de solo temporal do reservatório Umari (RN) desde a sua construção.

3.1 Área de estudo

A área de estudo consiste na bacia hidrográfica de contribuição do reservatório Umari (Figura 1), localizado no município de Upanema, no estado do Rio Grande do Norte (5°41'53,91"S; 37°14'37,19"W), sendo uma das sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró (De-Carvalho; Henry-Silva, 2020). A área estudada encontra-se inserida na Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, caracterizada por regime hidroclimatológico semiárido, tipo Bsh, segundo a classificação de Köppen, muito seco, muito quente e com a estação chuvosa mal distribuída para o outono (Alvares et al., 2013).

A referida bacia de contribuição é caracterizada como uma bacia exorréica, deficitária e intermitente, perenizada por meio do reservatório Umari, resultante do barramento do Riode Carmo, sendo a terceira maior barragem potiguar.

Figura 1. Mapa de localização da bacia de contribuição do reservatório Umari-RN.



Fonte: Autoria própria (2023).

A bacia de contribuição do reservatório Umari abrange, total ou parcialmente, os municípios de Campo Grande, Janduís, Caraúbas, Patu, Messias Targino, Upanema e Paraú. A Tabela 1 apresenta a porcentagem de contribuição de cada município para a bacia de Umari. Geograficamente, os municípios que mais contribuem com o reservatório Umari são Campo Grande, que ocupa 50,2% da área da bacia, Janduís, com 20,2%, e Caraúbas, com 13,37%.

Tabela 1. Percentual dos municípios que compõem a bacia de contribuição do reservatório Umari-RN

Município	% da Representatividade na bacia
Paraú	1,35
Upanema	2,85
Messias Targino	5,17
Patu	6,85
Caraúbas	13,37
Janduís	20,20
Campo Grande	50,20
Total	100

Fonte: Autoria própria (2023).

3.2 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Todos os procedimentos envolvendo técnicas de geoprocessamento foram realizados em ambiente SIG, no *software* de livre acesso “QGIS 3.22.7”, por meio do qual foi desenvolvido um conjunto de mapeamentos referentes à elaboração de cartas temáticas e funções matemáticas associadas ao cálculo dos índices de erosão laminar. Adotou-se uma mesma escala de representação em todas as cartas confeccionadas para a caraterização geoambiental e também para os fatores da EUPS e Tolerância de Perda de Solos (T).

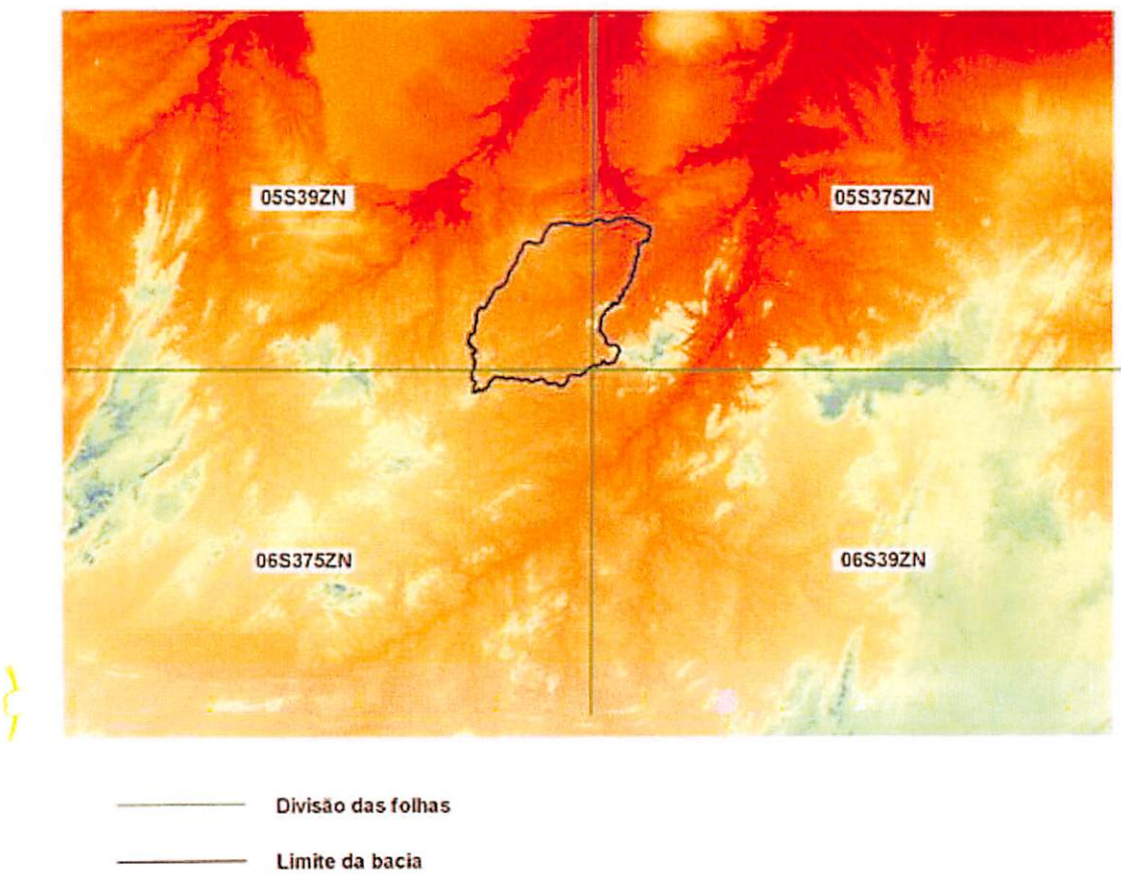
3.3 Delimitação da área de estudo

A delimitação da bacia de contribuição do reservatório Umari foi realizada manualmente por meio do processo de vetorização dos divisores de água. Para o melhor detalhamento dos limites das bacias, utilizou-se base cartográfica de sub-bacias hidrográficas fornecidas pelo IBGE (2021). As curvas altimétricas foram extraídas de Modelos Digitais de Elevação (MDE’s) fornecidos pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, projeto

Topodata (BRASIL, 2008), o qual disponibiliza dados de radar da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM), com resolução espacial de 30 m.

Dessa maneira realizou-se o mosaico das imagens SRTM correspondentes às folhas 05S39ZN, 05S375ZN, 06S39ZN e 06S375ZN, compondo um retângulo envolvente para área de interesse. O mosaico SRTM foi recortado para o retângulo envolvente de maneira a facilitar a extração das curvas de nível e posterior delimitação da área de estudo (Figura 2).

Figura 2. Mosaico Topodata com folhas que abrangem a área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.4 Caracterizações morfométricas da área de estudo

A morfometria e ordem dos rios foram produzidas a partir de diversos parâmetros morfométricos para classificação da bacia de contribuição do reservatório Umari. Os parâmetros utilizados estão relacionados à forma da bacia, às diferenças altimétricas, densidade e conexão dos cursos fluviais. A forma da bacia tem efeito sobre o tempo de concentração e afeta diretamente o tempo de transformação da chuva em escoamento, ou seja, o tempo para a água infiltrar ou escoar após a precipitação (Teixeira *et al.*, 2017). Comumente, são utilizados

três coeficientes como indicativos da forma: o Índice ou Coeficiente de compacidade (K_c); Índice de Circularidade (IC) e o Fator de forma (K_f).

O Coeficiente de compacidade é estabelecido entre a relação do perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de mesma área. Assim, quanto mais próximo o K_c estiver de 1, mais se aproximará ao formato de um círculo e quanto mais distante de 1 mais irregular, o que implicará em menor tendência à cheia (Cardoso *et al.*, 2006; Souza *et al.*, 2017). O K_c analisa o risco de enchentes, onde: K_c entre 1,00 e 1,25 – indica que a bacia apresenta alta propensão a grandes enchentes; de 1,26 a 1,50 – a bacia demonstra tendência mediana a grandes enchentes; e $>1,51$ – a bacia não está sujeita a grandes enchentes (Cardoso *et al.*, 2006; Souza *et al.*, 2017;).

O Índice de Circularidade demonstra a forma alongada da bacia, relacionando a área da bacia com seu perímetro, sendo importante para avaliar o risco de cheias rápidas em detrimento ao escoamento. Neste sentido, um IC = 0,51 indica uma bacia de escoamento moderado e com pequena propensão a cheias rápidas; IC $> 0,51$ indica que a bacia apresenta tendência ao formatocircular, muito suscetível a enchentes; IC $< 0,51$ apontam bacias de formato alongado, favorecimento do escoamento e menor probabilidade de cheias rápidas (De-Carvalho; Henry-Silva, 2020).

O Fator de forma expressa a razão entre a largura média da bacia (L) e o comprimento do eixo da bacia (L), da foz ao ponto mais longínquo da área. Sendo assim, o Fator de forma também indica maior ou menor tendência a enchentes de uma bacia: K_f de 1,00 a 0,75 – indica bacia com alta propensão a grandes enchentes; K_f de 0,74 a 0,50 – sugere bacia com tendência mediana a grandes enchentes e K_f de $< 0,49$ – aponta bacia não sujeita a grandes enchentes (Santos *et al.*, 2018).

Assim como o Fator de forma, o Índice de compacidade e Circularidade, a razão de alongação (K_e) está diretamente relacionada ao escoamento da Bacia Hidrográfica, pois bacias mais circulares tendem a recepcionar a precipitação de maneira mais uniforme do que bacias retangulares ou alongadas. Além disso, em bacias circulares a chegada da água precipitada à calha do rio principal tende a ser menos distribuída temporalmente, aumentando o risco de enchentes. Logo, a razão de alongação expressa a relação entre o diâmetro da área e o comprimento do eixo da bacia (Souza *et al.*, 2017; Teixeira *et al.*, 2017).

A Densidade de drenagem (D_d) avalia o escoamento, o grau de infiltração e a tendência à erosão de uma bacia hidrográfica (De-Carvalho; Henry-Silva, 2020). A D_d é definida pela relação entre o comprimento total dos cursos d'água da bacia (L_t) e sua área (Souza *et al.*, 2017). Assim, $< 0,50$ – corresponde a baixa densidade; 0,51 a 2,0 – densidademediana; 2,1 a

3,50 – alta densidade, e acima de 3,50 – densidade muito alta (Beltrame, 1994).

O Tempo de concentração é o tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia se desloque até a seção analisada. Para estimar esse parâmetro, é necessário correlacionar aspectos físicos da bacia com o tempo de concentração por meio de diversas equações empíricas, como, por exemplo, a Equação de Kirpich; Equação de Ven Te Chow; Equação de Picking e Equação de Giandotti (Santos *et al.*, 2018).

A aplicação do equacionamento de Kirpich (1940) é recomendada para áreas entre 0,004 e 0,81 km² (Mamédio; Castro; Corseiul, 2018). Na equação de Ven Te Chow, utiliza-se o comprimento do rio principal (L) e sua declividade (S) para determinar o tempo de concentração. Esta equação é aplicada em áreas que variam entre 1,1 e 19 km² (Mamédio; Castro; Corseiul, 2018). A equação de Giandotti é empregada para bacias rurais médias e pequenas (Mamédio; Castro; Corseil, 2018; Silveira, 2005). O equacionamento proposto por Giandotti utiliza a área da bacia (A), comprimento do rio principal (L) e sua declividade (S). Todas as equações supracitadas estão discriminadas no Quadro 01.

Quadro 01. Parâmetros morfométricos e equações para cálculos da bacia de contribuição do reservatório Umari-RN

Parâmetro	Equação	Descrição	Tendência a enchentes
Índice ou coeficiente de compacidade (Kc)	$K_c = \frac{0,28P}{\sqrt{A}}$	Relaciona a bacia a um círculo.	De 1,00 a 1,25= alta De 1,26 a 1,50= mediana ≥ 1,51 – não sujeita a enchentes
Índice de Circularidade (IC)	$ICC = \frac{12,57xA}{p^2}$	Quanto mais próximo do valor 1, maior a circularidade e mais sujeita a inundações.	0,51 moderado >0,51 forte <0,51 alongadas
Fator de forma (Kf)	$K_f = \frac{A}{Lax^2}$	Relação entre largura e comprimento para avaliação de geometria.	≥ 0,75 = alta 0,74 - 0,50 = média ≤ 0,49 = baixa
Razão de alongação (Ke)	$K_e = \frac{(1,28 * A^2)}{L}$	Relação entre o diâmetro da área e o comprimento do eixo da bacia.	
Densidade de drenagem (Dd) (km km ⁻²)	$D_d = \frac{L_t}{A}$	Soma de comprimento dos canais, em que se verifica a velocidade da drenagem.	< 0,50 – baixa; 0,51 a 2,0 – mediana; 2,1 a 3,50 – alta > 3,50 – muito alta
Tempo de concentração (Tc) (Kirpich)	$T_c = 57. \left[\frac{L}{\Delta h} \right]^{0,385}$	Tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia se desloque até a seção analisada.	
Tempo de concentração (Tc) (Vem Te Chow)	$T_c = 0,160L^{0,64} * S^{-0,32}$		
Tempo de concentração (Tc) (Picking)	$T_c = 0,0883L^{0,667} * S^{-0,333}$		
Tempo de concentração (Tc) (Giandotti)	$T_c = \frac{0,0559(4,0A^{0,5} + 1,5L)}{L^{-0,5}S^{0,5}}$		
Declividade (S1)	$S_1 = \frac{Cota\ máx - Cota\ mín}{L}$	Declividade do curso d'água, diferença de altitude entre o início e o fim de drenagem.	
Declividade (S3)	$S_3 = \left(\frac{\sum Li}{\sum \left(\frac{Li}{\sqrt{Si}} \right)} \right)^2$		

Fonte: Modificado de Souza *et al.* (2017).

3.5 Aquisição e processamento de imagens

A aquisição dos dados vetoriais se deu por meio da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) - Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2012, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no ano de 2019, das imagens do satélite Sentinel-2A, adquiridas junto à página web do Serviço Geológico do Governo dos Estados Unidos (USGS), das imagens com polarização em amplitude do ALOS PALSAR, do Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente (IDEMA) e do Núcleo de Estudos Socioambientais e Territoriais (NESAT).

O processamento de imagens foi realizado por meio do Sistema de Informações Geográficas (SIG) QGIS; 3.22.

3.6 Elaboração de cartas temáticas e caracterização geoambiental da área de estudo

O mapeamento temático consiste na realização das cartas de hidrografia, hipsometria, declividade, solos, pluviosidade e uso e cobertura da terra, a fim de se obter a caracterização geoambiental da área de estudo e gerar os dados necessários ao cálculo da EUPS.

3.6.1 Carta hidrográfica

A carta hidrográfica foi confeccionada utilizando-se dados vetoriais da rede de drenagem fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Para isto, adicionaram-se os dados vetoriais referentes à rede de drenagem e, utilizando a imagem SRTM, houve ajuste para a área de estudo.

3.6.2 Cartas de hipsometria e declividade

As cartas de hipsometria e declividade foram produzidas a partir do mosaico SRTM mencionado no item 3.3, que foi recortado para abranger exclusivamente a área de interesse, delimitada previamente por meio de vetores. A partir desses dados, foi possível criar as representações gráficas das variações altimétricas e inclinações presentes na região de estudo. O intervalo do grau de declividade foi classificado como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Classificação da declividade.

Classe	Categoria	Intervalo do grau de declividade do terreno (%)
1	Muito fraco	<6
2	Fraco	6 a 12
3	Médio	12 a 20
4	Forte	20 a 30
5	Muito forte	>30

Fonte: Spörl e Ross (2004).

3.6.3 Carta de solos

A carta de solos foi elaborada utilizando-se dados fornecidos pelo IBGE, com escala de 1:250.000, recortados para a área de interesse, uma vez que o arquivo disponibilizado correspondia a todo o território brasileiro. A determinação da área de cada uma das classes de solo foi realizada por meio da criação de uma nova coluna na tabela de atributos do arquivo vetorial de solo, denominada área, recorrendo-se à função \$area para determinação da área em hectare.

3.6.4 Carta de pluviosidade

Para a elaboração do mapa de pluviosidade, primeiramente foram adquiridos os dados de pluviosidade média anual em dez estações pluviométricas nas proximidades da área de estudo, fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária - EMPARN. Em seguida, houve preparação dos dados para o formato CSV, importado para o QGIS e assim georreferenciado, utilizando a ferramenta de vetorização “Pontos ao longo das linhas”, representando as isoietas. Depois, houve recorte apenas para a área de estudo.

3.6.5 Mapeamento de uso e cobertura da terra

Para elaboração do mapeamento de uso e cobertura da terra, foi utilizado o banco de dados de Uso e Cobertura da Terra fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, recortado apenas para a área de estudo utilizando o *software* QGIS.

3.7 Determinação da estimativa de perda de solos através da por meio da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)

Para determinação do potencial erosivo da área de estudo, foi utilizada a EUPS descrita pela Equação 1 (Wischmeier; Smith, 1978), calculando as perdas de solo por meio de fatores independentes que influenciam diretamente na perda de solo, são eles: clima, erosividade da chuva, erodibilidade do solo, uso e conservação do solo e topografia (Wischmeier; Smith, 1978).

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

Onde

A – perda de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$);

R – fator de erosividade das chuvas ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$);

K – fator de erodibilidade do solo ($t.h.MJ^{-1}.mm^{-1}$);

L – fator de comprimento de rampa

(m); S – fator de declividade (%);

C – fator uso e manejo (adm);

P – fator de práticas conservacionistas (adm).

Embora esta equação seja uma formulação empírica, continua sendo a de máxima referência no Brasil para avaliação de perda de solo, além de ser o método mais empregado até os dias atuais, demonstrando a relação dos principais fatores que influenciam a erosão hídrica (Oliveira *et al.*, 2015).

3.7.1 Fator erosividade da chuva (R)

O cálculo do fator R foi realizado com base nos índices mensais de erosão, obtidos por meio da Equação 2, proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992). Este fator representa a susceptibilidade de uma chuva em causar erosão em um solo desprotegido. Devido à falta de dados pluviométricos para estudos e às dificuldades de aplicação direta, foram elaboradas equações para utilizar informações disponíveis. Rufino *et al.* (1993) desenvolveram equações para o cálculo da erosividade, utilizando como base dados pluviométricos, os quais empregam um coeficiente de precipitação pluvial.

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

Onde:

EI – média mensal do índice de erosão (MJ ha⁻¹mm⁻¹h⁻¹ano⁻¹);

p – precipitação pluvial média mensal (mm);

P – precipitação pluvial anual (mm).

Foi analisada a série histórica pluviométrica de dez diferentes estações (Tabela 2) encontradas nos municípios da bacia de contribuição do reservatório Umari, no período de 2001 (ano de inauguração do reservatório) a 2021, totalizando, desse modo, 20 anos de dados contínuos, disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Agropecuária - EMPARN.

Tabela 3. Estações pluviométricas.

Município	Estação	Latitude	Longitude
Campo Grande	Augusto Severo - ANA	-5,86722	-37,31472
Campo Grande	Particular	-5,85	-37,3167
Campo Grande	Particular	-5,85	-37,3
Caraúbas	Particular	-5,7833	-37,5667
Janduís	Emater	-6,0167	-37,4
Messias Targino	Prefeitura	-6,078	-37,5138
Paraú	Prefeitura	-5,7667	-37,1
Patu	Particular	-6,1	-37,6333
Upanema	Prefeitura	-5,6333	-37,2667
Upanema	Upanema – ANA	-5,64361	-37,25528

Fonte: Autoria própria (2023).

3.7.2 Fator erodibilidade dos solos (K)

Representadas pelo fator K, as propriedades físicas e as características bioquímicas e mineralógicas do solo desempenham distintas influências na erosão, conferindo a cada tipo de solo uma resistência ou susceptibilidade a este processo. Deste modo, todas as características

do solo avaliadas determinam sua capacidade de propiciar erosão, sendo necessário determinar valores diferentes de K para cada tipo de solo (Bertoni e Lombardi Neto., 2014; El Jazouli *et al.*, 2017).

A identificação e classificação dos tipos de solos presentes na bacia hidrográfica foram realizadas a partir do Mapa de Solos do Estado do Rio Grande do Norte, com escala de 1:250.000 (EMBRAPA, 2007), gerando uma camada vetorial composta por polígonos no *software* QGIS 3.22.7. Com base na literatura, adotaram-se os seguintes valores de K para cada tipo de solo.

Tabela 4. Classificação do Fator K para diferentes solos.

ID	Solo	K
1	Neossolo Flúvico	0,03660
2	Neossolo Háptico	0,04300
3	Gleissolo Sálico	0,21900
4	Neossolo Litólico	0,03620
5	Argissolo Vermelho-Amarelo	0,05920
6	Planossolo Nátrico	0,02190
7	Latossolo Amarelo	0,02770
8	Latossolo Vermelho	0,01500
9	Luvissolo Crômico	0,03840
10	Neossolo Quartizarênico	0,48700

Fonte: Autoria própria (2023).

Adicionalmente, foi criada uma nova coluna denominada ‘área’, na qual foi atribuída a função \$area para calcular a área (retornando seu valor numérico) de todos os polígonos que compõem o vetor. Posteriormente, os valores de área obtidos foram agrupados e somados de acordo com a respectiva classe.

O fator K pode ser também classificado de acordo com sua potencialidade à erodibilidade, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5. Classificação do Fator K para diferentes solos.

Propensão a erodibilidade	K (t.h.MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
Extremamente alta (fase erodida)	>0,0600
Muito alta	0,0459 – 0,0600
Alta	0,0300 – 0,0450
Média	0,0150 – 0,0300
Baixa	0,0090 – 0,0150
Muito baixa	<0,0090

Fonte: Modificado de Mannigel *et al.* (2002).

3.7.3 Fator comprimento de rampa e declividade (LS)

O fator LS representa o fator topográfico, em que o fator L se refere ao comprimento da encosta, e o fator S ao grau de declividade. O fator L está atrelado à topografia do local, mais precisamente ao comprimento de rampa, apresentando elevada importância na perda de solo, visto que quanto maior for sua extensão maior será a velocidade de escoamento. O fator S se refere à declividade do solo, sobretudo pela sua inclinação, que tem forte influência no escoamento, tendo relação direta com o processo erosivo e de carreamento das partículas da superfície do solo (Costa *et al.*, 2016; El Jázouli *et al.*, 2017). A influência do declive e do gradiente afetam a intensidade erosiva do solo, pela ação da água. O fator L está ligado ao S, encontrado em literatura, por estarem na mesma classificação de fatores topográficos (Belasri *et al.*, 2016; Schmidt *et al.*, 2019 Abdulkareem *et al.*, 2019).

Os valores de L foram obtidos utilizando o plugin Processing do *software* QGIS. Esse plugin permite a aplicação de algoritmos para calcular o comprimento de rampa utilizando a ferramenta Slope Length do *software* SAGA GIS. A partir dos dados de elevação provenientes do modelo numérico de terreno (MNT), que se baseou na imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), fornecida pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos, foi gerada uma camada raster contendo os valores de L correspondentes à área de estudo. Dessa maneira, o fator L (comprimento de encosta) foi obtido por intermédio da Equação 3.

$$\beta = \frac{\left(\frac{\text{sen}\theta}{0,0896}\right)}{(3\text{sen}\theta^{0,8}+0,56)}$$

$$m = \frac{\beta}{(1+\beta)}$$

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j}+D^2)^{m+1}-(A_{i,j}+D^2)^{m+1}-(A_{i,j})^{m+1}}{X_{i,j}^m+D^{m+2}}$$

Onde

$L_{i,j}$ – fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas(i,j);

$A_{i,j}$ – área de contribuição de uma célula com coordenadas (i,j) (m^2);

D – tamanho da grade de células (m);

$X_{i,j}$ – valor da direção do fluxo;

m – coeficiente dependente da declividade;

B – quociente entre a erosão em sulcos e entre sulcos.

Os valores de S foram obtidos utilizando a ferramenta de análise de terrenos no *software* QGIS, que se baseia no modelo numérico de terreno para gerar os valores de declividade em porcentagem. Com o objetivo de facilitar os cálculos para a integração desses fatores, foi utilizado o método expresso pela equação desenvolvida por Bertoni *et al.* (2014) (Equação 5). O cálculo foi realizado por meio da ferramenta Calculadora Raster, utilizando as camadas geradas anteriormente para ambos os fatores.

Após a criação do dado, ele foi reclassificado em cinco diferentes classes (Tabela 6) por meio da ferramenta *r.reclass* do GRASS GIS. Em seguida, a área de cada classe foi calculada para ambas as bacias usando a ferramenta *r.report*, também do GRASS GIS.

Tabela 6. Classificação do fator LS.

Classe	Classe Intervalo de valores do fator LS
1	0 a 2,00
2	2,01 a 5,00
3	5,01 a 08,00
4	08,01 a 12,00
5	> 12,00

Fonte: Autoria própria (2023).

3.7.4 Fator da forma de uso e cobertura da terra (C) e fator das práticas conservacionistas (P)

Com o objetivo de obter o fator CP, produto dos fatores C e P, procedeu-se à manipulação da tabela de atributos contendo os valores de uso e cobertura da terra, gerados para a confecção da carta correspondente (item 3.7.5). Nesse processo, foram criadas colunas para armazenar os índices necessários ao cálculo do fator CP. Os valores necessários ao cálculo do fator CP foram atribuídos de acordo com as aproximações constantes na Tabela 7.

Tabela 7. Valores aproximados de C e P.

Uso do solo	Fator C	Fator P
Agricultura	0,1376	0,5
Pastagem	0,01	0,5
Vegetação	0,003	0,04

Fonte: Modificado de Tomazoni e Guimarães (2005).

Por fim, utilizando a ferramenta Calculadora de Campo no QGIS, foi criada uma coluna denominada CP, na qual o valor de cada célula foi calculado a partir do produto das colunas C e P.

3.7.5 Fator A - perda média anual de solo

Após o processamento dos dados originais e a obtenção de todos os fatores componentes da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), a ferramenta Calculadora Raster do *software* livre e aberto QGIS foi empregada para realizar a álgebra de mapas. As camadas foram multiplicadas conjuntamente, conforme a Equação 1, para integrar os fatores da equação. Esse procedimento resultou na geração do mapa da estimativa de perda de solo, correspondente ao fator A da EUPS, usando-se valores contidos nos rasters individuais dos fatores previamente obtidos, LS, R, K e CP. Os valores obtidos foram reclassificados em sete diferentes classes de perda de solo apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Classes de perda de solo.

Classe	Intervalo de valores do fator A (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)
1	0 a 2,50
2	2,51 a 5,00
3	5,01 a 10,00
4	10,01 a 15,00
5	15,01 a 20,00
6	20,01 a 50,00
7	> 50,00

Fonte: Modificado de Tomazoni e Guimarães (2005).

Em seguida, a imagem reclassificada foi convertida para formato vetorial para possibilitar o cálculo dos valores de área de cada classe, utilizando a função \$area. Por fim, os valores de área obtidos foram agrupados e somados de acordo com a respectiva classe.

3.8 Tolerância de perda de solos (T) e vida útil do reservatório

A tolerância de perda de solos é expressa como uma taxa de erosão do solo em toneladas por hectare por ano (t/ha/ano) ou em uma porcentagem de perda de solo por unidade de área e tempo. De acordo com Mannigel *et al.* (2002), pode ser calculada para cada horizonte do solo considerado a partir da equação 4.

$$T = h.Ds.f.10 \tag{4}$$

Onde:

T – tolerância de perda de solo (t ha⁻¹ano⁻¹);

Ds – densidade do solo (t m⁻³);

h – espessura do horizonte considerado (m);

f – fator de conversão inerente à variação textural.

Foi elaborada tabela de atributos dos dados vetoriais referentes à carta de solos (item 3.7.3), criando-se a coluna denominada Limite de perda, preenchida com valores encontrados na literatura, classificados em dois níveis categóricos, Ordem e Subordem (Tabela9).

Tabela 9. Valores de tolerância de perda de solos utilizados.

Classe de solo	Tolerância de perda de solo T (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)
ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico	10,54
GLEISSOLO HÁPLICO	8,70
LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico	13,90
LATOSSOLO VERMELHO Eutroférrico	13,56
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico	5,28
NITOSSOLO VERMELHO Eutroférrico	15,94

Fonte: Modificado de Demarchi e Zimback (2014).

Estimar a vida útil de um reservatório com base na capacidade máxima e na perda de solo por erosão envolve uma abordagem simplificada, mas pode fornecer uma estimativa inicial. Desta maneira, foram reunidos dados sobre a capacidade máxima do reservatório (volume de água que ele pode armazenar) e sua capacidade atual de armazenamento, disponibilizados pela ANA (Agência Nacional de Águas).

Dividindo a capacidade máxima inicial do reservatório pela redução anual da capacidade de armazenamento, tem-se uma estimativa da vida útil em anos, levando em consideração apenas a perda de solo por erosão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização morfométrica da área de estudo

A área da bacia de contribuição do reservatório de Umari-RN abrange uma área de 1.512,005 km². Resultados similares foram observados em que a área apresentou 1.533,00 km² (SEMARH, 2021; Lemos Filho; Espínola Sobrinho; Oliveira Junior *et al.*, 2021). Em De-Carvalho e Henry-Silva (2020), foi considerada uma área de contribuição de 1.547,00 km². Essas diferenças são insignificantes e não comprometem a base de cálculo dos parâmetros morfométricos da área. Além disso, essas variações se devem às ferramentas de geoprocessamento e imagens de satélite utilizadas.

A bacia do reservatório é classificada como de 6ª ordem, conforme classificação de Strahler (1954), corroborando achados de De-Carvalho e Henry-Silva (2020). Esse grau de ramificação de bacia inserida em zona de clima semiárido favorece o escoamento superficial e linear (Peixoto *et al.*, 2021).

A bacia apresentou índice de compacidade (Kc) de 1,48 adm, sugerindo tendência mediana a grandes enchentes (entre 1,25 e 1,50); índice de circularidade (IC) de 0,45 e razão de alongação (Ke) de 0,72 adm, apontando um formato alongado que favorece o escoamento e apresenta menor probabilidade de cheias rápidas; e fator de forma (Kf) de 0,40 adm, reafirmando uma bacia não sujeita a grandes enchentes. Ao estudar a Bacia de Umari, De-Carvalho e Henry-Silva (2020) relataram resultados semelhantes: Kc de 1,40, IC de 0,50 e Kf de 0,37, ou seja, todos classificados nos mesmos parâmetros (forma alongada e bacia não sujeita a grandes enchentes), ao passo que os resultados obtidos por Peixoto *et al.* (2021) identificaram para o alto curso da bacia hidrográfica do rio Carmo/RN um Kc de 1,32, de forma que os resultados encontrados corroboram a literatura.

Ao analisar a forma da sub-bacia, o coeficiente de compacidade para identificar a predisposição natural para enchentes na área de deflúvio, Peixoto *et al.* (2021) concluíram que o coeficiente de compacidade da sub-bacia é baixo, apresentando formato tendendo mais para circular do que alongado, favorecendo o acúmulo da água drenada dos tributários no leito principal durante a estação chuvosa.

A conjunção de fatores como características hidrológicas de chuvas concentradas entre três e quatro meses e ocorrência de secas periódicas, além da baixa infiltração de água no solo, conferem à sub-bacia do Rio do Carmo um deflúvio variável, apesar de não

existirem registros sobre prejuízos causados por inundações, uma vez que há pouca ocupação dos leitos do rio principal.

A densidade de drenagem (Dd) da bacia em estudo foi de 0,74 km/km², se localizando na faixa entre 0,51 a 2,0 – mediana – apresentando equilíbrio entre escoamento e infiltração, concordando com estudo de De-Carvalho e Henry-Silva (2020), no qual foi encontrado o mesmo valor de Dd. Por sua vez, Peixoto *et al.* (2021) encontraram Dd de 1,04 km/km² para o alto curso da bacia hidrográfica do Rio do Carmo/RN, que, apesar de se encontrar na mesma faixa - mediana, os autores classificam como alta em virtude da pluviometria média em torno de 725 mm anuais.

O tempo de concentração da Bacia do Umari, calculado com base em Kirpich, foi de 579,68 min ou aproximadamente nove horas; Ven Te Chow foi de 361,88 min ou aproximadamente seis horas; Picking foi de 385,81 min ou seis horas e Giandotti aproximadamente de 13 horas. Todas as características morfométricas da bacia estão resumidas na Tabela 10.

Tabela 10. Características morfométricas da bacia de contribuição do reservatório Umari, Rio Grande do Norte.

Parâmetro	Valor	Unidade
Perímetro (P)	205,92	km
Área de drenagem (Sd)	1512,005	km²
Eixo (L)	61,11	km
Comprimento do canal principal (Cp)	29,19	km
Comprimento total dos canais (Lt)	1117,01	km
Extensão média do escoamento superficial (I)	6,18	km
Comprimento total do rio principal	803389	m
Is - Índice de sinuosidade (adm.)	1,19	adm.
Tc - Tempo de concentração (Kirpich)	579,68	min.
Tc - Tempo de concentração (Vem te Chow)	361,88	min.
Tc - Tempo de concentração (Picking)	385,81	min.
Tc - Tempo de concentração (Giandotti)	13,15	horas
Declividade S1	0,002111	m/m
Declividade S3	0,001903	m/m

Fonte: Autoria própria (2023).

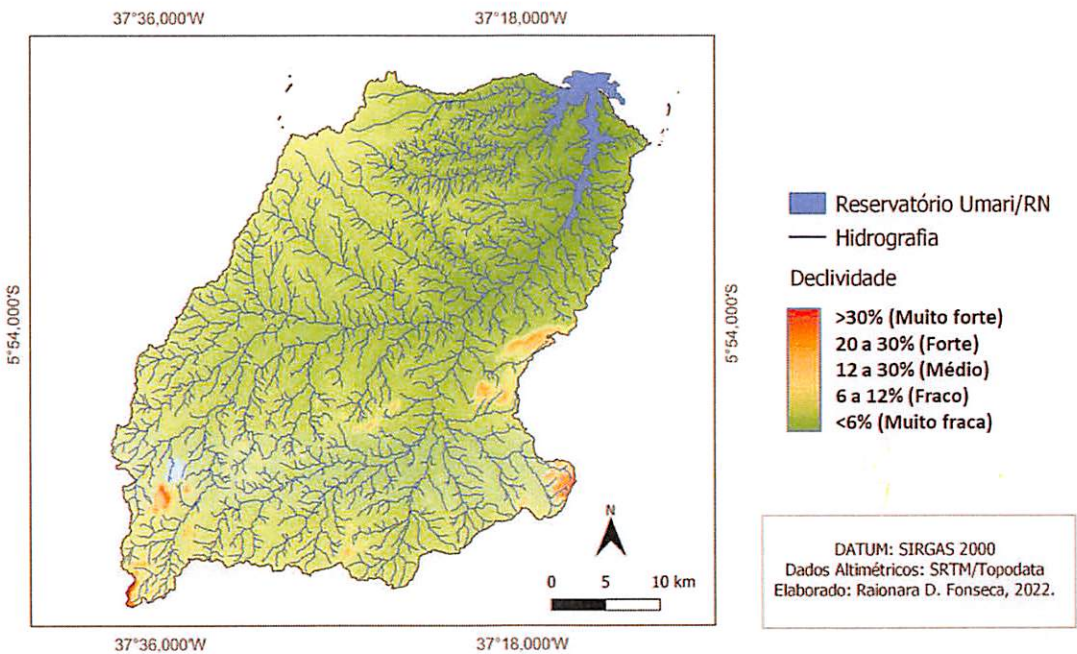
4.2 Caracterização geoambiental da área de estudo

A bacia de contribuição do reservatório Umari apresenta amplitude altimétrica elevada, sendo identificada a maior cota com 217 m e a menor com 47 m (Figura 3). Entretanto, sua baixa declividade (0,001903 m/m) e seu índice de sinuosidade (1,19 adm) indicam baixa velocidade de escoamento, bem como uma bacia com cursos hídricos retilíneos,

característica que torna favorável a conservação e preservação da bacia. A bacia é composta por uma diversidade de formas do relevo, incluindo áreas de planície, colinas e pequenas serras. A topografia influencia diretamente o escoamento de água e a formação de bacias hidrográficas menores que drenam para o reservatório.

Analisando a Figura 3, é possível constatar que no setor de alto curso, onde a elevação do terreno é maior, a bacia de contribuição apresenta relevos mais acentuados, predominando faixas de declividade muito forte (>30%) a forte (20 a 30%), chegando a quase 700m de elevação. No setor de baixo curso, com áreas de menor elevação, próximos ao reservatório Umari, observa-se áreas de baixo relevo com declividade predominantemente fraca (6 a 12%) a muito fraca (<6%), com média de 50m de elevação.

Figura 3. Declividade na área da bacia de contribuição do reservatório Umari-RN.



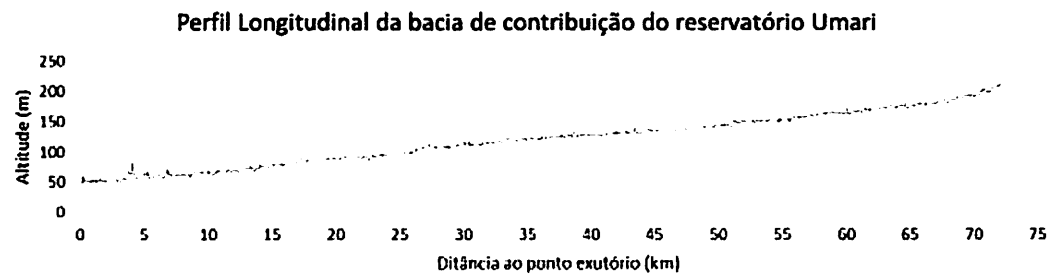
Fonte: Autoria própria (2022).

Foi possível relacionar que a drenagem acompanha as áreas depressionais, devido ao deslocamento do curso hidrológico nas áreas com diferenças de altitudes no relevo. Resultados semelhantes foram encontrados por De-Carvalho e Henry-Silva (2020), em que classificaram a velocidade de escoamento como reduzida, baixa declividade com decaimento suave, favorecendo a redução das taxas de erosão.

As curvas hipsométricas revelaram que no reservatório Umari existe maior volume de água em profundidades baixas, característica que facilita a entrada de luz, favorecendo o

suporte à produtividade biológica e uma ressuspensão de sedimentos, com reflexos positivos na colonização das margens por comunidades vegetais (Figura 4).

Figura 4. Perfil hipsométrico do curso d’água principal da bacia de contribuição do reservatório Umari, Rio Grande do Norte.



Fonte: Autoria própria, 2023.

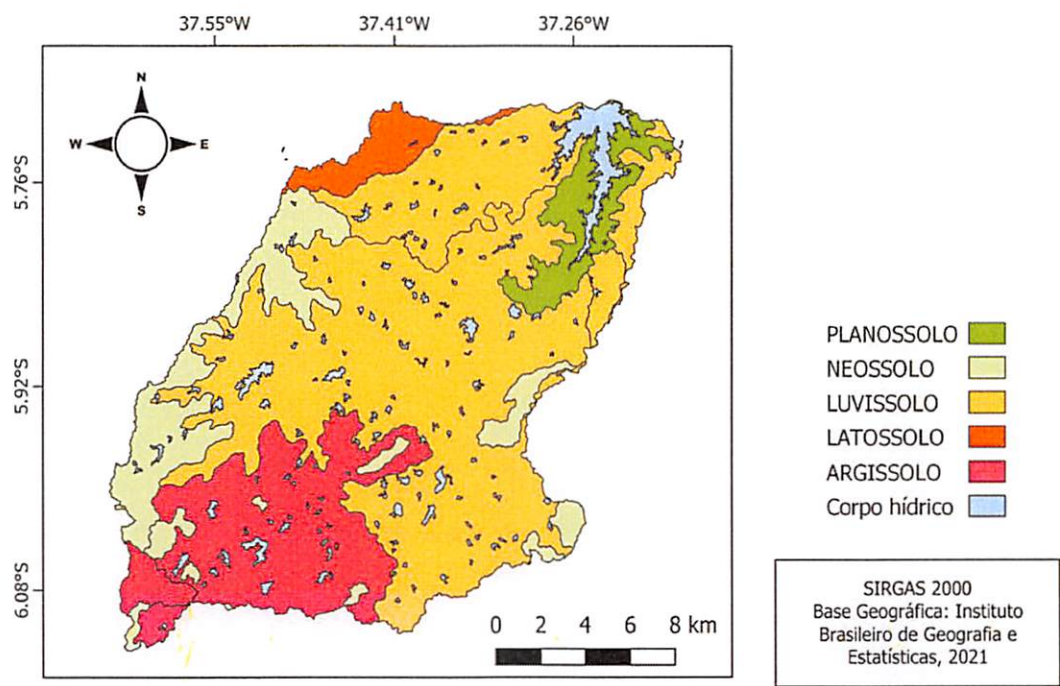
A baixa profundidade do reservatório Umari contribui com uma possível instabilidade térmica e, por consequência, uma maior mistura das massas de água, facilitada pela ação dos ventos. Em estudos anteriores, Moura *et al.* (2015) apresentaram o mapeamento batimétrico do reservatório Umari com 14.227 m de comprimento, 8,0 m de profundidade média e 28 m de profundidade máxima, com volume armazenado de 114.866,034 m³.

O contexto geológico em que se insere a bacia hidrográfica do Apodi-Mossoró apresenta duas condições geológicas distintas em que a primeira representa o embasamento cristalino, correspondendo ao ambiente da parte inicial da bacia, composta pelos maciços estruturais e pela depressão sertaneja. A segunda condição é a transição deste ambiente geológico no sentido da foz, região do Médio e Baixo Oeste do estado, expresso pela formação das rochas sedimentares (arenitos, argilitos e calcárias) até o contato com a planície litorânea, onde se encontram os sedimentos quaternários e as formações dunares (Amorim, Valadares e Portela, 2021). É relevante a influência dos diferentes tipos de rocha e condições de relevo na formação dos solos existentes na bacia de contribuição do reservatório Umari. Destacam-se o material de origem e a geomorfologia como fatores de maior relevância na interpretação da pedogênese, uma característica marcante do domínio da caatinga é a grande variabilidade espacial dos solos em curtas distâncias, sobretudo nos ambientes de rochas cristalinas ou de coberturas pedimentares pouco espessas sobre as formações cristalinas (Amorim, Valadares e Portela, 2021).

A Figura 5 apresenta a classificação dos tipos de solo, onde foi constatada em maior extensão a presença de Luvissolo, principalmente no médio e baixo curso da bacia, possuindo alta capacidade de infiltração (crucial para recarga de aquíferos), reduzindo o

escoamento superficial e minimizando o risco de erosão. Na extensão do reservatório, foi identificado o Planossolo, sujeito a inundações periódicas. O segundo solo com maior extensão na bacia foi o Argissolo, encontrado no alto curso da bacia, região com maior altitude, o que potencializa o escoamento superficial e velocidade da água, favorecendo a erosão hídrica, devido à sua capacidade relativamente baixa de infiltração. O solo que teve menor presença foi o Latossolo Litólico Eutrófico, entretanto foi diagnosticado nas áreas com maior altitude. A porcentagem das classes de solo por bacia pode ser observada na Tabela 11.

Figura 5. Tipos de solo na área da bacia de contribuição do reservatório Umari-RN.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 11. Áreas das classes de solo.

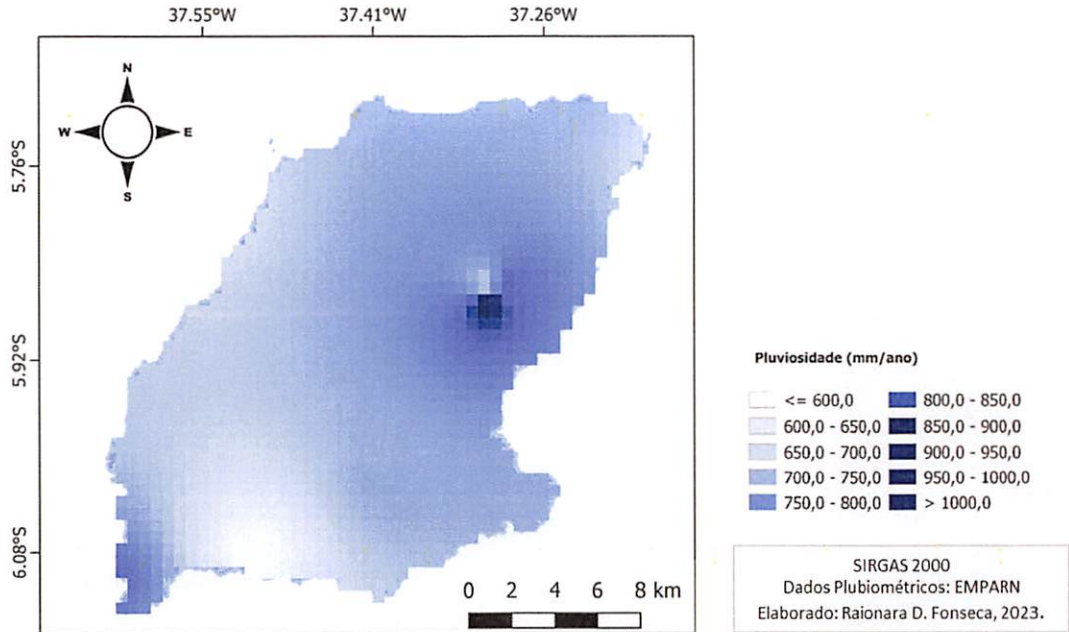
Classe de solo	Área (ha)	(%)
LUVISSOLO	85929,0	56,83
ARGISSOLO	27643,4	18,28
NEOSSOLO	18903,6	12,5
PLANOSSOLO	7206,23	4,77
LATOSSOLO	4772,86	3,16
Total	151200,5	100

Fonte: Autoria própria (2023).

No Estado do Rio Grande do Norte, a região semiárida possui classificação climática o Bsh, de acordo com a classificação climática de Alvares et al. (2013). A região característica do semiárido apresenta distribuição irregular de chuvas ao longo do ano, com uma estação chuvosa curta e uma estação seca longa e rigorosa. As precipitações médias anuais são geralmente baixas, o que pode levar a períodos prolongados de estiagem, com precipitação anual normalmente inferior a 750 mm (Alvares et al., 2013). Essa classificação climática do reservatório Umari é relevante para a gestão dos recursos hídricos na região, já que o clima semiárido representa desafio significativo para o fornecimento de água, a agricultura e outras atividades humanas. O conhecimento do clima local é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável e conservação dos recursos naturais, visando à adaptação às condições climáticas e à garantia da disponibilidade de água para a população e o meio ambiente na bacia de contribuição do reservatório Umari.

A carta de precipitação pluviométrica da área de estudo pode ser visualizada na Figura 6. Observa-se que os níveis de precipitação aumentam no sentido que se desloca da região nordeste para região norte da bacia, ou seja, no setor médio a baixo curso há uma incidência maior de chuvas (de 900 a acima de 1000 mm/ano), ao passo que o setor de alto curso (região de cabeceirada bacia) possui índice de pluviosidade menor que 600 mm/ano.

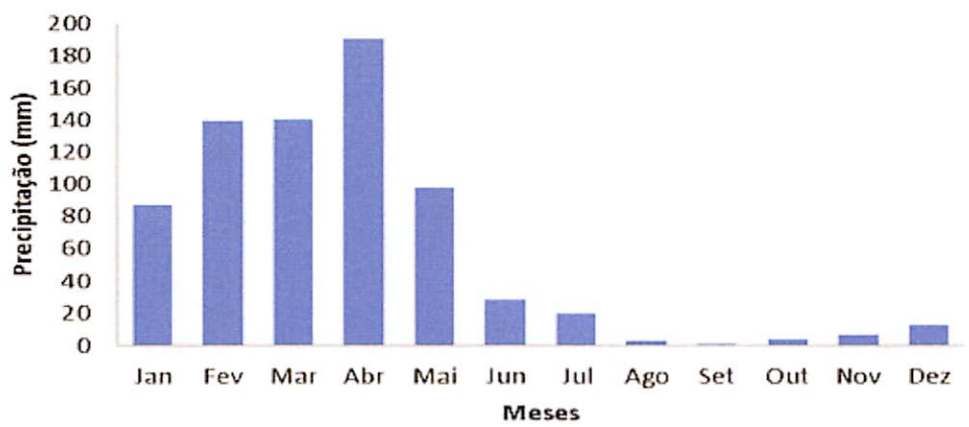
Figura 6. Mapa de precipitação pluviométrica da área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme Gráfico 1, observa-se que na série histórica analisada as médias das chuvas na área de estudo acima de 100 mm concentram-se nos meses de fevereiro, março e abril. Por sua vez, as médias acima de 60 mm concentram-se nos cinco primeiros meses do ano e a partir do mês de junho as médias mensais caem abruptamente, alcançando a menor média mensal no mês de setembro, com apenas 1,2 mm.

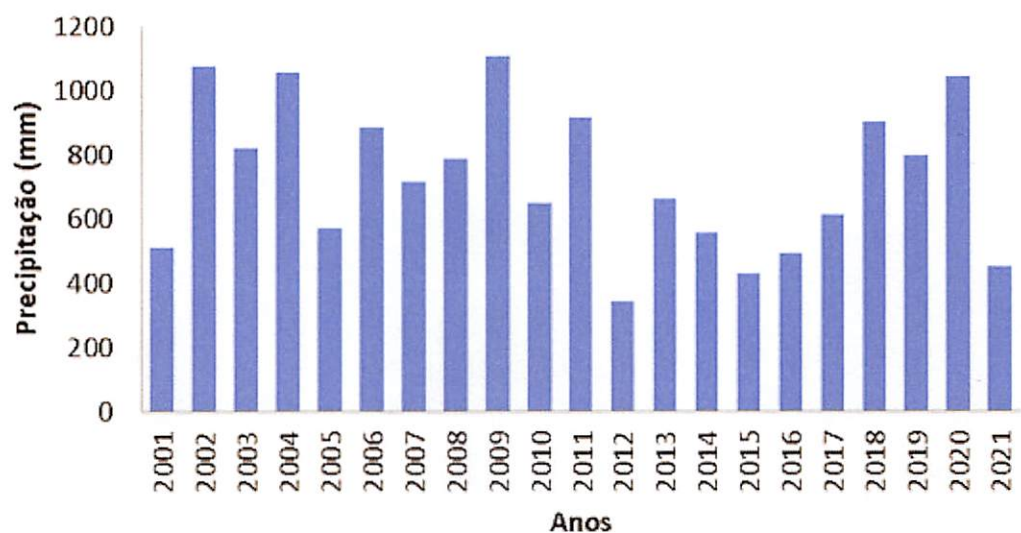
Gráfico 1. Normal climatológica mensal da bacia de contribuição do reservatório (2001-2021).



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados pluviométricos cedidos pela EMPARN (2023).

O Gráfico 2 apresenta os totais anuais da série histórica (2001-2021), desde a construção do reservatório Umari em 2001, de dados de precipitação na área em estudo. Nesses dados, é possível perceber que as precipitações totais anuais ocorridas nesse período são, em sua maioria, próximas a 600 mm. No entanto, é possível identificar totais pluviométricos acima do esperado para regiões semiáridas, principalmente para a região estudada, como os anos de 2002, 2004, 2009 e 2020, ultrapassando 1000 mm, episódios extremos que sugerem intensidades de chuvas com alto potencial erosivo. Essa classificação climática do reservatório Umari é relevante para a gestão dos recursos hídricos na região, já que o clima semiárido representa desafio significativo para o fornecimento de água, a agricultura e outras atividades humanas. A compreensão do clima e precipitação local é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável e conservação dos recursos naturais, visando à adaptação às condições climáticas e à garantia da disponibilidade de água para a população e o meio ambiente na bacia de contribuição do reservatório Umari.

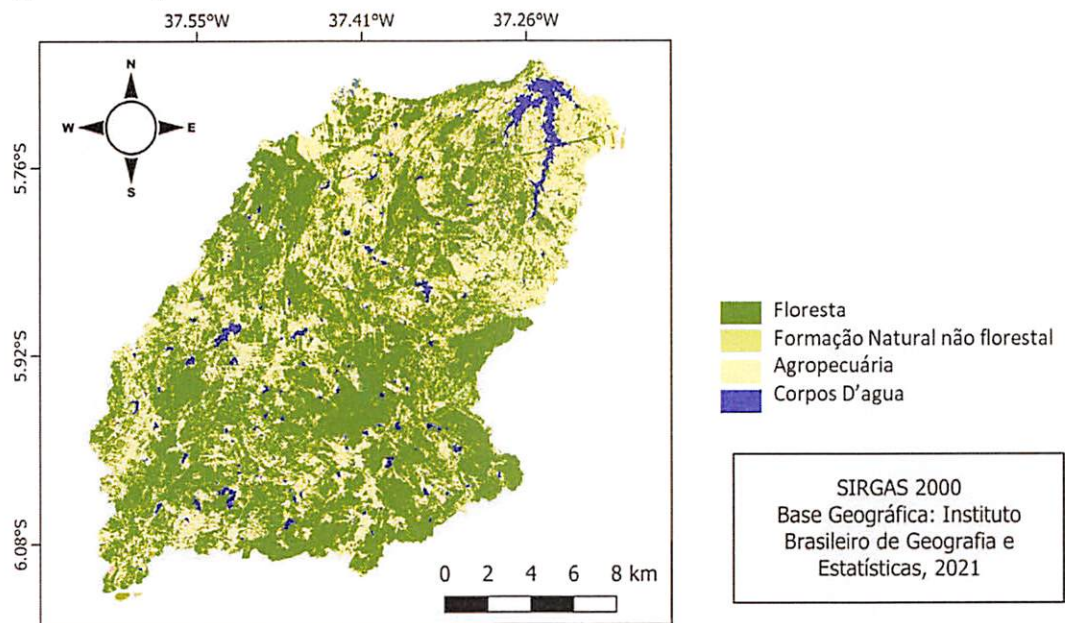
Gráfico 2. Precipitação total anual (2001-2021).



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados pluviométricos cedidos pela EMPARN (2023).

A Figura 7 apresenta os usos e cobertura do solo na área da bacia de contribuição do reservatório Umari, onde 3,13% correspondem às áreas com água represada, com a formação do reservatório, e algumas áreas da bacia podem ter sido inundadas, resultando em corpos d'água permanentes ou temporários. Uma área de 19,77% apresenta solo exposto, geralmente são áreas utilizadas para a criação de gado e pecuária em geral. Solo com cobertura vegetal rala, com 29,57% e 47,50% área com cobertura vegetal adensada, inclui áreas utilizadas para agricultura e vegetação nativa que também possuem essas características. Percebe-se que as áreas com solo mais exposto se apresentam mais concentradas no entorno do lago Umari, o que torna essas áreas mais susceptíveis à erosão e, consequentemente, assoreadas. De acordo com o IBGE (2020), a principal atividade econômica praticada por estes municípios é a agricultura tradicional de subsistência devido à vulnerabilidade às secas climatológicas. É importante ressaltar que a dinâmica do uso e cobertura do solo na bacia de contribuição do reservatório Umari pode sofrer alterações ao longo do tempo, influenciada pelo crescimento urbano, expansão agrícola e outras atividades humanas.

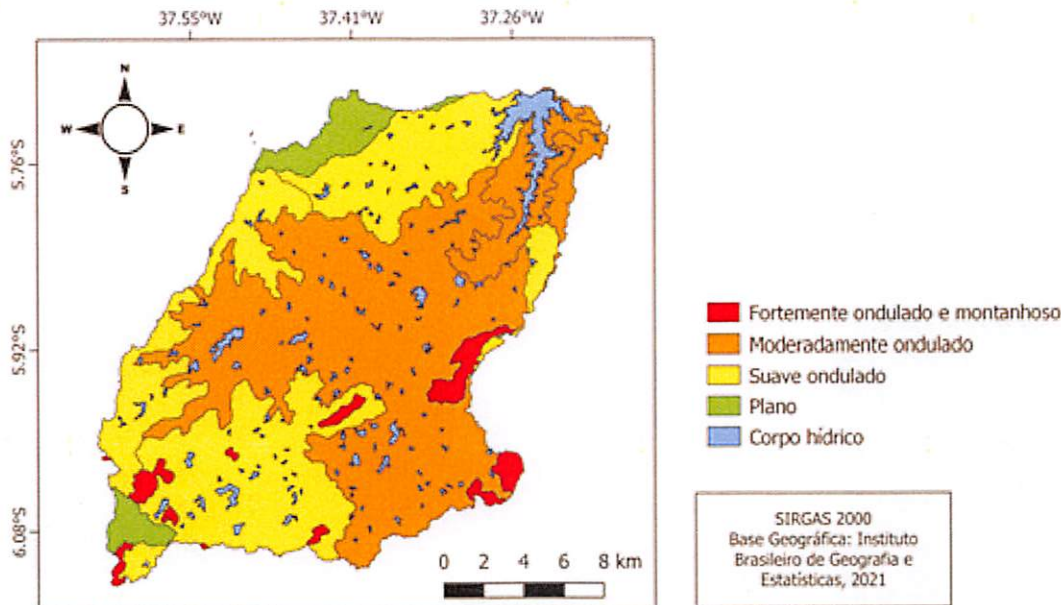
Figura 7. Mapa de uso e cobertura do solo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para o caso específico da disposição das áreas vegetadas das bacias, ao observarmos a Figura 8, que consiste na formação de relevo obtidos a partir de dados da EMBRAPA, é possível proceder à análise comparativa entre a cobertura do solo e relevo, tendo as áreas com menor cobertura vegetal relevo moderadamente ondulado, encontrando-se principalmente no médio e baixo curso.

Figura 8. Mapa de relevo da área de estudo.



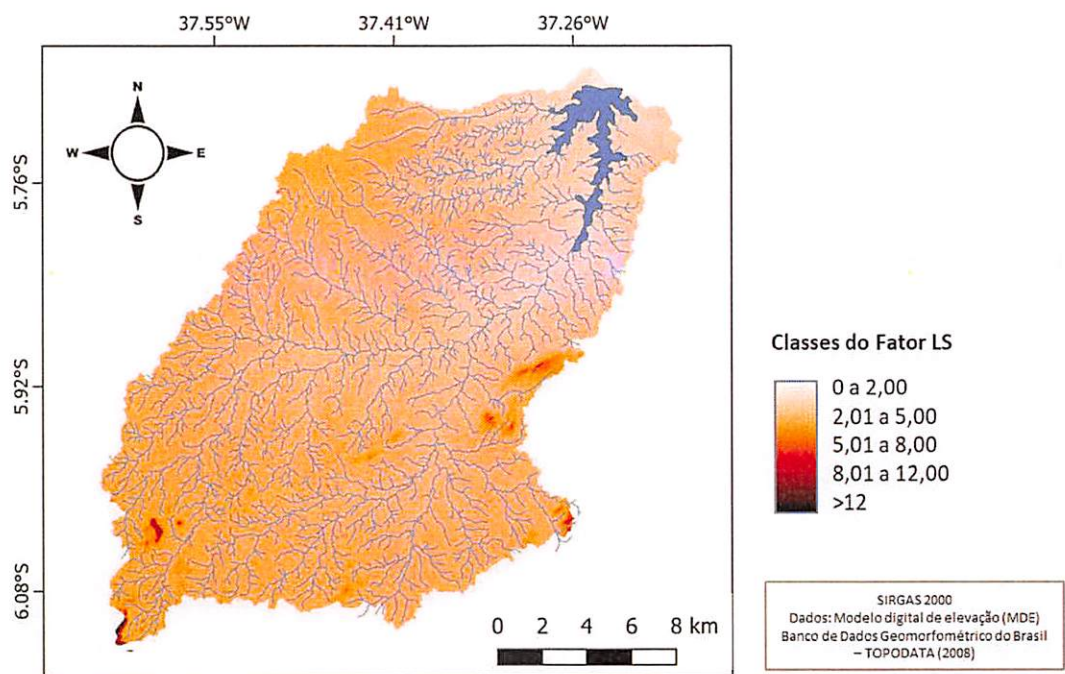
Fonte: Autoria própria (2023).

O monitoramento e o manejo sustentável dessas áreas são fundamentais para garantir a conservação dos recursos naturais, a proteção do meio ambiente e a disponibilidade de água na bacia hidrográfica. A compreensão do uso atual do solo é essencial para o planejamento de ações visando à proteção e à gestão adequada dessas áreas, buscando a sustentabilidade ambiental e o equilíbrio entre as necessidades humanas e a conservação dos ecossistemas locais.

4.3 Cartas dos fatores da EUPS (R, K, LS e CP)

Ao verificar os dados obtidos por meio da espacialização e confecção das cartas de dos fatores de erosividade, erobibilidade, comprimento de rampa/declividade e uso e manejo, é possível identificar áreas com maior potencial de erosão e contribuir para a adoção de medidasde manejo do solo e conservação de recursos hídricos em locais mais susceptíveis à erosão. Aoanalisar a carta do comprimento de rampa (Figura 9), notam-se valores baixos de comprimento de rampa em torno do reservatório.

Figura 9. Fator LS (comprimento de rampa e declividade)



Fonte: Autoria própria (2023).

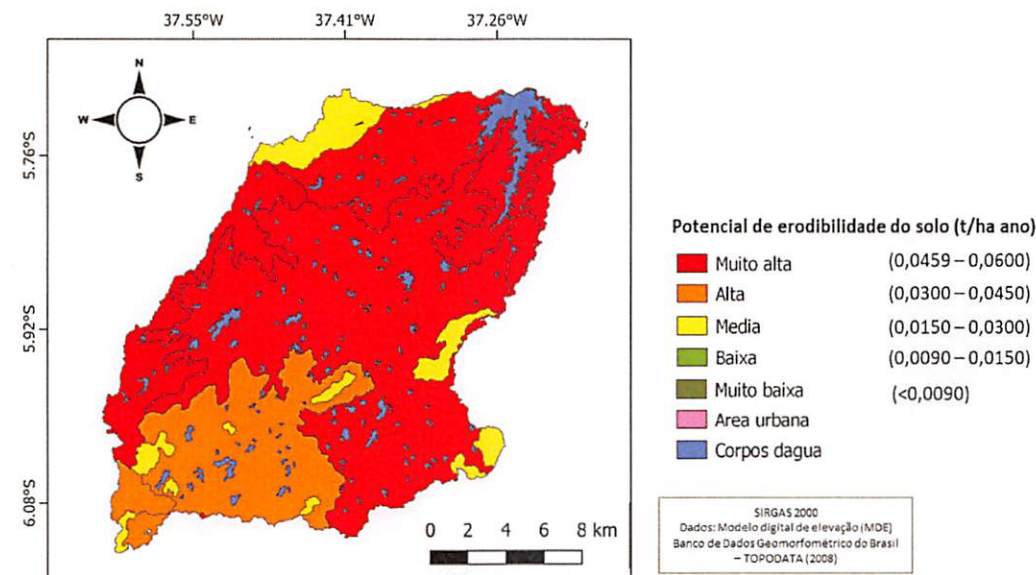
Na porção de médio curso, predominam valores entre 125 e 377 m e quanto maior for o comprimento de rampa mais plano será o relevo, ou seja, o terreno é menos dissecado, na região abrange que os Luvissolos. Na região de alto curso, ocorrem os valores mais elevados (377 a > 600m), maiores comprimentos de rampa; nessas regiões, ocorrem os

Argissolos. As regiões de maior valor do LS acompanham as variações de dissecação do terreno e são visivelmente relacionadas à declividade.

O fator K (erodibilidade do solo) varia de acordo com o tipo de solo, pois mesmo que as condições geomorfológicas, climáticas e de uso e cobertura da terra sejam iguais em solos argilosos e arenosos, suas características físicas e químicas distintas influenciam na suscetibilidade à erosão. Consequentemente, os solos arenosos são mais susceptíveis à erosão do que os solos argilosos (Tomazoni; Guimarães, 2005).

Conforme ilustrado na Figura 10, a propensão à erodibilidade da área de estudo em maior porção é classificada como Muito Alta (73%), seguida por Alta (18%) e Média (6%). A área ocupada pela classificação “Muito alta” compreende os Luvisolos, Neossolos e Planossolos, além de relevo moderadamente ondulado e vegetação campestre, deste modo, corroborando para este resultado, a chuva impacta diretamente o solo, removendo partículas e provocando a erosão laminar. A região classificada por “Alta” possui solo totalmente Argissolo, relevo de moderadamente ondulado a plano; apesar de sua relativa resistência à erosão, os Argissolos podem ser afetados pelo processo erosivo em situações nas quais ocorrem práticas de manejo inadequadas, como o revolvimento excessivo do solo ou o cultivo em declives acentuados, fazendo com que a estabilidade da estrutura do solo possa ser comprometida, aumentando a erosão laminar. A área de menor propensão à erodibilidade da bacia em estudo, classificada como “Média”, é compreendida principalmente por Latossolo e uma pequena porção de Neossolos, em virtude da sua estrutura e capacidade de agregação das partículas do solo. Em solos muito argilosos e compactados, a infiltração de água pode ser dificultada, aumentando o escoamento superficial e o risco de erosão em sulcos.

Figura 10. Fator K (erodibilidade do solo).

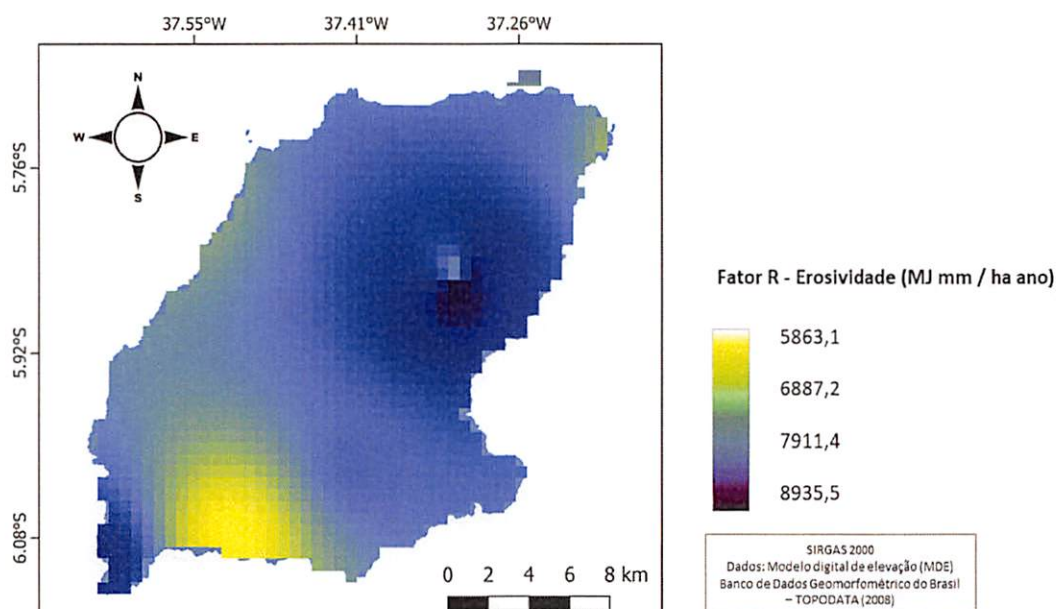


Fonte: Autoria própria (2023).

Semelhantemente à precipitação pluviométrica, os valores do fator R (erosividade das chuvas) aumentam no sentido que se desloca da região de sudoeste para a região norte e nordeste da área de estudo, em faixa que vai de 5863,1 a 8935,5 MJ mm ha⁻¹ ano⁻¹, conforme Figura 1.

A erosividade das chuvas é mais significativa na região de baixo curso, diminuindo gradualmente à medida que se avança para as áreas de médio e alto curso. A variação da precipitação pluviométrica torna-se relevante, pois possui grande variação pluviométrica espacial anual e tem-se uma variação de aproximadamente 3000 MJ mm ha⁻¹ ano⁻¹ no valor da erosividade, considerando que os maiores valores de erosividade se concentram na região com relevo fortemente ondulado, erodibilidade alta, declividade acentuada e alta pluviosidade, diretamente relacionadas à intensidade e duração das precipitações: chuvas mais intensas e prolongadas tendem a ter maior poder erosivo, uma vez que a energia dessas chuvas é capaz de impactar o solo com maior força, provocando o desprendimento de partículas e o arraste dos sedimentos.

Figura 11. Fator R (erosividade das chuvas)

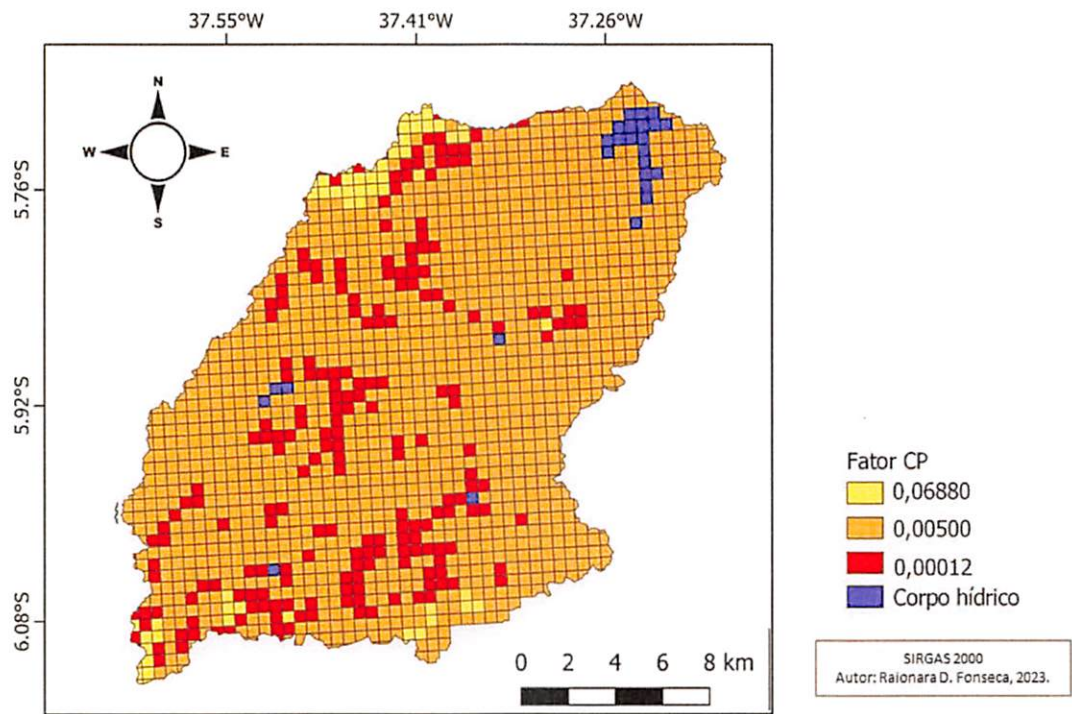


Fonte: Autoria própria (2023).

O fator CP (cobertura da terra e práticas conservacionistas), visualizado na Figura 12, mostra que áreas com maiores valores de fator CP são áreas agrícolas que, apesar de possuírem relevo plano, quando ocorre erosão laminar, aumentam a capacidade de desprendimento em virtude da falta de cobertura do solo, acarretando o transporte e deposição das partículas por meio do escoamento superficial. Em maior proporção, são observados valores médios de CP (0,0050), são áreas de vegetação campestre, porém com relevo moderadamente ondulado com alta taxa de erodibilidade. Por sua vez, os valores baixos de CP são encontrados em áreas que possuem ocupação de vegetação, o que confere maior proteção ao solo diante da força de impacto das gotas de chuva, minimizando este fator.

As práticas de conservação incluem diversas ações, como o plantio em curvas de nível, terraceamento, adoção de sistemas agroflorestais, cultivo mínimo, dentre outras. Essas medidas visam a reduzir a velocidade do escoamento da água, promover a infiltração no solo, aumentar a cobertura vegetal e proteger as áreas vulneráveis à erosão. O fator CP é um importante indicador para avaliar o impacto das práticas de manejo do solo e da vegetação na redução da erosão hídrica em uma região, pois sua utilização permite direcionar ações de conservação do solo e adotar medidas que contribuam para a preservação dos recursos naturais e a sustentabilidade ambiental.

Figura 12. Fator CP (cobertura da terra e práticas conservacionistas)



Fonte: Autoria própria (2023).

4.4 Perda de solo média

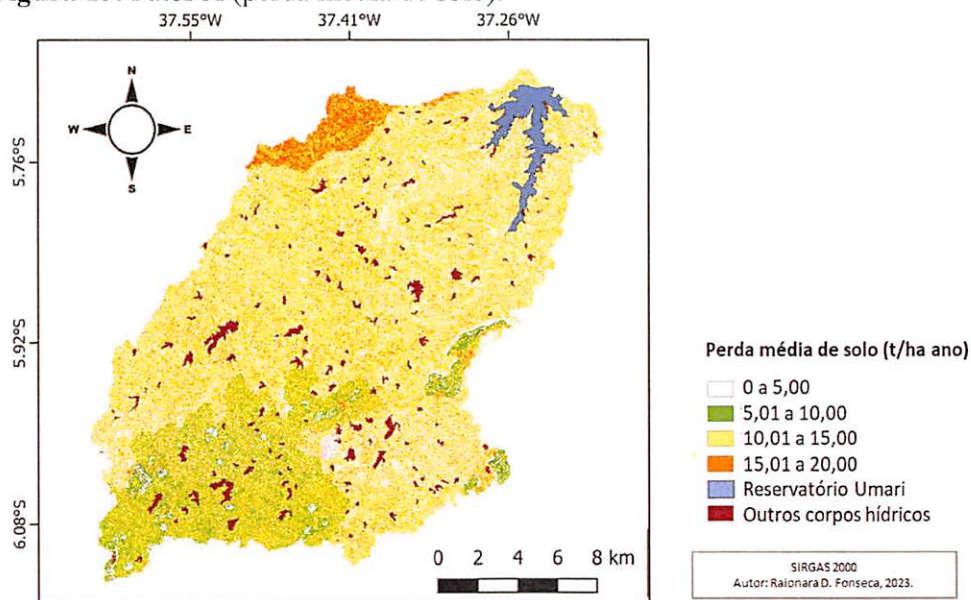
Na Figura 13, pode-se observar que os valores mais baixos de A (perda média de solo), com valores até 5 t/ha/ano, estão presentes nas regiões de vertentes mais elevadas, onde o relevo é menos dissecado e os Argissolos predominam, região de alto curso da bacia. Os fatores de erosividade (R) e cobertura e da terra e práticas conservacionistas (CP) têm forte influência nessa região, possuem baixas taxas, permitindo a diminuição da perda de solo. Por outro lado, valores médios (10 a 15 t/ha/ano) de perda de solo são encontrados nas regiões de vertentes médias e baixas, onde os solos do tipo Luvisolos e Planossolos são mais comuns e o relevo apresenta maior grau de dissecação, os fatores de erodibilidade (K) e comprimento da rampa e declividade (LS) têm forte influência nesses resultados.

No geral, a perda de solo da área de estudo não ultrapassou 20 t/ha/ano, estando as maiores perdas concentradas no setor noroeste do baixo curso da bacia, onde predominam os Latossolos que, apesar de áreas de relevo plano, possuem áreas agrícolas, erodibilidade considerável e pluviosidade acima da média, justificando essa alta taxa de perda de solo.

Abrangendo a maior parte da área de estudo, valores de 10 a 15 t/ha/ano de perda de solo média anual foram encontrados para a bacia. A determinação do quantitativo para uma perda de solo média anual aceitável em uma região semiárida é um desafio particular devido às

características específicas desse ambiente, como a escassez de água e a fragilidade dos solos. Embora não haja um valor universalmente estabelecido, a literatura científica sugere que taxas de erosão mais baixas podem ser necessárias para preservar a sustentabilidade dessas áreas. Em um contexto semiárido, onde os recursos hídricos são limitados, o impacto da erosão do solo pode ser amplificado. Nesse sentido, estudos indicam que taxas de perda de solo média anual de até 2 toneladas por hectare por ano (t/ha/ano) podem ser mais apropriadas para proteger a produtividade do solo e a qualidade da água em regiões semiáridas, uma vez que taxas mais altas podem levar à degradação do solo, redução da fertilidade e escassez de nutrientes. Essa referência se alinha com a ideia de que, em regiões onde os recursos naturais já são limitados, é fundamental minimizar as perdas de solo para garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos e ambientais (Lal, 2001).

Figura 13. Fator A (perda média de solo).



Fonte: Autoria própria (2023).

Em resumo, o fator A na bacia de contribuição do reservatório Umari-RN desempenha papel importante na distribuição espacial das taxas de erosão do solo, sendo influenciado pelo relevo, pelos tipos de solo presentes na região e pluviosidade. O conhecimento desses padrões é essencial ao planejamento e implementação de práticas de conservação do solo e manejo adequado da bacia, visando à proteção dos recursos naturais e à redução dos impactos da erosão hídrica na área.

4.5 Vida útil do reservatório

A perda média anual de solo que prevalece na área da bacia em estudo é de 15 t/ha/ano, ao passo que a área do reservatório é de aproximadamente 4.430 ha. Considerando a redução anual na capacidade de armazenamento em função da área total do reservatório, conclui-se que sua vida útil total é de aproximadamente 295 anos a partir do início de sua operação, em 2002. Vale ressaltar que essa abordagem simplificada considera apenas a perda de capacidade de armazenamento devido à sedimentação causada pela perda de solo. Outros fatores como a vazão do rio, a entrada de sedimentos de fontes não erosivas e as práticas de manejo da bacia de contribuição, também podem influenciar a taxa real de sedimentação.

Portanto, a vida útil de um reservatório pode variar desde algumas décadas até várias centenas de anos, dependendo das condições específicas. É crucial realizar avaliações hidrológicas, de sedimentação e de qualidade da água, bem como adotar práticas adequadas de manejo e manutenção, para garantir que o reservatório funcione de forma eficaz e sustentável ao longo do tempo. Em áreas semiáridas, a escassez de água e as características específicas do clima e do solo podem influenciar a taxa de sedimentação e a vida útil dos reservatórios. Em algumas situações, reservatórios no semiárido podem ter vida útil mais curta devido a uma combinação de fatores, como a erosão do solo, a falta de chuvas regulares e a menor capacidade de recarga.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos dados morfométricos permitiu compreender o regime hidrológico e inferir sobre o manejo e conservação da bacia de contribuição do reservatório Umari, a qual apresentou formato alongado, com baixa tendência a enchentes e cheias grandes, além de ser classificada como de 6ª ordem, ou seja, bem ramificada. Possui baixa velocidade de escoamento, bem como uma bacia com cursos hídricos retilíneos, característica que a torna favorável à conservação e preservação da bacia.

A metodologia utilizada se mostrou uma ferramenta eficiente para o diagnóstico e planejamento das ações de conservação em relação à erosão do solo, contribuindo para a promoção de práticas sustentáveis de uso da terra e a preservação do meio ambiente na região estudada.

A utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG), por meio do QGIS, para a espacialização da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) provou ser uma metodologia eficiente para obter resultados de estimativa de erosão laminar do solo em grandes áreas, além de ser um *software* gratuito de fácil acesso, apresentando resultados semelhantes a outros estudos de perda de solo por erosão.

A perda de solo média da área em estudo concentrou-se em uma faixa de estimativa de perda anual de solo de 10 a 15,0 t ha⁻¹ ano⁻¹. A ocorrência de solo exposto evidencia fragilidade no manejo da atividade agropecuária, fator que contribui para a ampliação dos riscos de assoreamento da área de drenagem e açudes. Desta forma, a presente pesquisa contribuiu para um melhor planejamento ambiental e tomada de decisões quanto à gestão de recursos hídricos.

Considerando a perda de solo média anual, a estimativa da vida útil do reservatório foi de aproximadamente 295 anos desde a sua construção, restando atualmente 275 anos.

REFERÊNCIAS

ABDULKAREEM, J. H.; PRADHAN, B.; SULAIMAN, W. N. A., & JAMIL, N. R. Prediction of spatial soil loss impacted by long-term land-use/land-cover change in a tropical watershed. **Geoscience Frontiers**, v. 10, n. 2, p. 389-403. 2019.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, dec. 2013.

ALVAREZ, J. W. R.; PELLEGRINI, A.; KOCHER, M. L.; SCHAEFER, G. L.; CAPOANE, V.; TIECHER, T.; FORNARI, M. R.; SANTOS, D. R. Erosão hídrica e perda de sedimento, água e nutrientes durante eventos pluviais em duas bacias hidrográficas rurais. **Investigación Agraria**, v. 16, p. 113-123, 2014.

AMORIM, J. V. A.; VALLADARES, G. S.; PORTELA, M. G. T. Classificação não-supervisionada de imagens rapideye no mapeamento da cobertura das terras do delta do parnaíba, piauí. **Revista Geosaberes**, v. 12, p. 88, 2021.

ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. Caracterização do meio físico da bacia do arroio boa vista - Guamiranga-PR. **Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 21, p. 46–58, 2007.

ARAUJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. 10.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.

AVANZI, J. C. **Modelagem do escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos Tabuleiros Costeiros**. 2005. 68p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

BASSO, R. E; ALLASIA, D. G; TASSI, R; PICKBRENNER, K. Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 635-641, 2016.

BELASRI, A., LAKHOULI, A. Estimation of soil erosion risk Using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and geoinformation technology in Oued el Makhazine watershed, Morocco. **Journal of Geographic Information System**, v. 8, n. 1, p. 98- 10, 2016.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação**. Florianópolis: UFSC, 1994.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BANDEIRA, D. H.; PAZFERREIRO, J.; VÁZQUEZ, E. V. Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: A case study under subtropical condition in Santa Catarina highlands, Brazil. **Geoderma**, v. 287, p. 116-125, 2016.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone Ed., 2012.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Equação de perdas de solo. In: _____. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 2014. p. 248-267.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Balanço hídrico e estimativa do consumo relativo de água da cultura da cana-de-açúcar na região noroeste paulista. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 94-101, 2018.

BRASIL. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 11 abr. 2023.

BRITO, J. L. S.; LIMA, S. C.; SHIKI, S.; MOREIRA, M.R. Uso do geoprocessamento na estimativa da perda de solos por erosão laminar em Iraí de Minas - MG. IN: Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, **Anais...**, 9. Santos, 1998.

CAI, Q.; YANG, Z.; XUE, Y.; ZHU, A. X. Using GIS-based RUSLE, remote sensing, and topographic data to assess soil erosion in the upper Yangtze River basin, China. **Catena**, v. 167, p. 287-301, 2018.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.

CEBALLOS, A.; LLOPIS-ALBERT, C.; KEESSTRA, S. D. Using GIS-based models to assess the susceptibility of soil erosion and its relation with land use changes in a Spanish agricultural area. **Science of the total environment**, v. 557, p. 22-32. 2016.

CHRISTOFOLETTI, A. **A geografia física no estudo das mudanças ambientais**. Geografia e meio ambiente no Brasil. São Paulo; Rio de Janeiro: HUCITEC (Coleção Geografia: Teoria e Realidade), 1995. p. 334-345.

COSTA, B. O.; DE OLIVEIRA, G. S.; PISSARA, T. C. T.; CAMPOS, S.; WERNER, A.; SANTOS, J. P.; VANZELA, L. S. Factors of soil erosion in the Córrego Rico watershed, São Paulo, Brazil. **Irriga**, v. 21, n. 3, p. 530-544, 2016.

CROKE, J.; HAIRSINE, P.; FOGARTY, P. Evaluating the SDR, a new conceptual model of sediment yield for river basins. **Journal of Hydrology**, v. 309, n. 1-4, p. 173-190, 2005.

DEBAENE-GILL, S.; GOVERS, G.; GARCÍA-RUIZ, J. M.; VANMAERCKE, M.; POESEN, J. Impact of forest loss on soil erosion and sediment yield: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 1, p. 1-54, 2021.

DE-CARVALHO, H. R. L.; HENRY-SILVA, G. G. Caracterização morfométrica das bacias de contribuição dos reservatórios Umari e Mendubim, semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista de Geografia**, v. 37, n. 3, p. 221-238, 2020.

DEMARCHI, J. C.; ZIMBACK, C. R. L. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do Ribeirão das Perobas. **Energia na Agricultura**, v. 29, n. 2, p. 102-114, 2014.

DESHMUKH, A. S.; GOKHALE, P. S.; MISHRA, S. K. Sedimentation and its impacts on storage capacity of large sized dams - A review. **Aquatic Procedia**, 4, 1001-1008. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 18, p. 17785-17801, 2017.

EL JAZOULI, A.; BARAKAT, A.; GHAFIRI, A.; EL MOUTAKI, S.; ETTAQY, A.; KHELLOUK, R. Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in middle atlas (Morocco). **Geoscience Letters**, v. 4, n. 25, p. 44, 2017.

EMBRAPA. **Mapas de solos dos municípios do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife. Centro Nacional de Solos. 2007. UEP.

FARHAN, Y.; NAWAISEH, S. Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 6, p. 4649-4669, 2015.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS Equação Universal de Perdas De Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, p.41, 2006.

FAVIS-MORTLOCK, D. T.; BOARDMAN, J. Nonlinear responses of soil erosion to climate change: a modelling study on the UK South Downs. **Catena**, v. 25, n. 4, p. 365–387, 1996.

FRAGA, M. S.; FERREIRA, R. G.; SILVA, F. B.; VIEIRA, N. P. A.; SILVA, D. P.; BARROS, F. M.; MARTINS, I. S. B. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Catolé Grande, Bahia, Brasil. **Nativa**, v. 2, n. 4, p. 214-218, 2014.

GHAZAVI, R; KAVIAN, A; SHAHMORADI, B; SADEGHI, S. H. R. Influence of soil properties on sediment concentration and runoff rates: a case study of gullies in Iran. **Catena**, v. 193, p. 104650, 2020.

GOVERS, G.; VAN OOST, K.; POESEN, J. The role of tillage erosion in sediment delivery to rivers: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 64, n.4, p. 316- 337, 2003.

GOVERS, G.; VAN OOST, K.; POESEN, J. Soil erosion and sediment transport in the Belgian Ardennes: A review. **Journal of Soils and Sediments**, v. 7, n. 6, p. 375-387, 2007

GUERRA, A. J. T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 16, p. 32-37, 2005. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47282>. Acesso em: 10 jun. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base cartográfica de sub-bacias hidrográficas**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html>. Acesso em: 20 jun. 2023.

JANSEN, J. M. L.; PAINTER, R. B. Predicting sediment yield from climate and topography. **Journal of Hydrology**, v. 21, n. 4, p. 371-380, 1974.

JORGE, J. A. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas, Brasil: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. p. 328.

KARAMESOUTI, M.; PETROPOULOS, G. P.; PAPANIKOLAOU, I. D.; KAIRIS, O.;

KOSMAS, K. Erosion rate predictions from PESERA and RUSLE at a mediterranean site before and after a wildfire: comparison & implications. **Geoderma**, v. 261, p. 44-58, 2016.

KIRKBY, M. J. The problem. In: KIRKBY, M. J.; MORGAN, R. P. C (org.). **Soil Erosion**. Brisbane: John Wiley e Sons, 1980. p. 1-16.

LAL, R. Soil Erosion and the Global Carbon Budget. **Environmental International**, v. 37, n. 3, p. 572-584. 2011.

LEMOS FILHO, L. C. A.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; OLIVEIRA JÚNIOR, H. S. Clima e recursos hídricos na bacia hidrográfica do Apodi-Mossoró-RN. In: CARVALHO, R. G. (org.). **Rio Apodi-Mossoró: meio ambiente e planejamento**. Mossoró/RN: EDUERN, 2021. p. 37-62.

LEMOS, M. S. S.; BAHIA, V. G. Erosividade da chuva. **Informe Agropecuário**, v. 16, p. 25-31, 1992.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010

LI, R., DANG, T., & YUAN, Z. Impact of rainstorm intensity and duration on soil erosion on the Loess Plateau. **Land Degradation & Development**, v. 30, n. 8, p. 964-976. 2019.

LI, Z., ZHANG, Q., ZHANG, J., & HU, H. Assessment of reservoir sedimentation in large watershed by coupling RUSLE and SWAT models. **Water**, v. 8, n. 12, p. 558, 2016.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2008.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, v. 51, n. 2, p. 189-196, 1992.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão Dos Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 735-741, 2003.

MAMÉDIO, F.; CASTRO, N.; CORSEUIL, C. Tempo de concentração para Bacias Rurais Monitoradas na Região do Planalto Basáltico no Sul do Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 15, n. 4, p. ????, 2018.

MANNIGEL, A. R. et al. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MATA, C. L.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; GUIMARÃES, R. F. Avaliação multitemporal da susceptibilidade erosiva da bacia do rio Urucaia (MG) por meio da equação universal de perda de solos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 2, p. 57-71, 2007.

MATOS, T. V. S. **Determinação de áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica com base na equação universal de perda de solo (USLE)**. 2015. 116f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

MERTENS, J., KNAPEN, A., MUYS, B., & VAN ORSHOVEN, J. GIS-based landslide modeling at different scales: a review. **Earth-Science Reviews**, v. 162, p. 224- 247, 2016.

MINGOTI, R. **Produção de sedimentos em microbacias hidrográficas em função do relevo e da cobertura florestal**. 2009. 101f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

MITASOVA, H.; HOFIERKA, J.; ZLOCHA, M.; IVERSON, L. R. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 10, n. 5, p. 629-641, 1996.

MITASOVA, H.; BARTON, M.; ULLAH, I.; HOFIERKA, J.; HARMON, R. S. Modelagem de Erosão do Solo Baseada em GIS, **Tratado de Geomorfologia**, v. 3, n. 9, p. 64, 2013.

MONTGOMERY, D. R. Soil Erosion and Agricultural Sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 33, p. 13268-13272, 2007.

MONTGOMERY, D. R.; BECHTEL, T. D.; ALVARADO, A. GIS-based modeling of sediment supply and reservoir sedimentation for data-limited environments. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 545-556. 2014.

MOURA, R. S.; VARELA, R.; LOPES, Y.; HENRY-SILVA, G. Morphometric parameters of santa cruz and umari reservoirs, Rio Grande Do Norte Semiarid, Brazil. **Boletim do Instituto de Pesca**. v. 41, p. 355-363, 2015.

NERY, C. V. M.; LIMA, F. A. Uso do Geoprocessamento na determinação das perdas de solo por erosão laminar na Bacia Hidrográfica do Córrego Canabrava. **Anais... XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR**, Foz do Iguaçu PR, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, p. 4002- 4008.

OLIVEIRA, P. T. S.; NORTON, L. D.; SILVA, A. P. Análise do potencial de erosão hídrica e risco ambiental em área de recarga de aquífero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 11, p. 802-808, 2019.

OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; WENDLAND, E. Orders of magnitude increase in soil erosion associated with land use change from native to cultivated vegetation in a Brazilian savannah environment. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 11, p. 1524-1532, 2015.

PAIVA, E. M. C. D. Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. In: PAIVA, J. B.D.; PAIVA, E. M.C. (org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 365-394.

PANAGOS, P., MEUSBURGER, K; BALLABIO, C; BORRELLI, P; ALEWELL, C. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. **Science of the Total Environment**, v. 511, p. 801-814. 2015.

PARANHOS FILHO, A. C. et al. Avaliação multitemporal das perdas de solos. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 52, p. 49-59, 2003.

PEIXOTO, R. A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E. Estudo do transporte de sedimentos no Rio Jordão, localizado na mesorregião do Triângulo Mineiro-MG. **Acta Scientiarum Technology**, v. 43, e51714, 2021.

POESEN, J. Impact of forest loss on soil erosion and sediment yield: a review. **Critical reviews in environmental science and technology**, v. 1, p. 1-54. 2021.

PRADO, J. P. B.; NÓBREGA, M. T. Determinação de perdas de solo na bacia hidrográfica do córrego Ipiranga em Cidade Gaúcha, Estado do Paraná, com aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS). **Acta Scientiarum Technology**, v. 27, p. 33-42, 2005.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. (1997). **Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. USDA Agriculture Handbook N°. 703.

RINALDI, M.; GURNELL, A. M.; GONZÁLEZ, T.; BUSSETTINI, M.; HENDRIKS, D. Classificação da morfologia e hidrologia do rio para apoiar a gestão e restauração. **Ciências Aquáticas: pesquisa além das fronteiras**, v. 78, p. 17-33. 2016.

RUFINO, R. L.; BISCAIA, R. C. M.; MERTEN, G. H.; Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná através da pluviometria: Terceira aproximação. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 17, p. 439-44. 1993.

SANTOS, C. L.; SILVA, O. G.; VITAL, S. R. O.; WANDERLEY, L. S. A. Análise de suscetibilidade à ocorrência de enchentes e inundações na bacia do rio Jaguaribe – João Pessoa/PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, p. 1876-1888. 2018.

SCHMIDT, S.; TRESCH, S.; MEUSBURGER, K. Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands. **Methodsx**, v. 6, p. 219-229, 2019.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS – SEMARH. **Boletim diário** n° 114/2021. 2021. Disponível em: <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/semarh/DOC/DOC00000000261272.PDF>. Acesso em: 21 jun. 2023.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RIMA, 2004.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.

SOUZA, N. S.; SOUZA, W. J.; CARDOSO, J. M. S. Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 453-462, 2017.

STRAHLER, A. N. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. IN: CHOW, V. T. (org.). **Handbook of Applied Hydrology**, McGraw Hill, New York, v. 4, p. 39-76, 1954.

TEIXEIRA, M. B.; CAMARGO, P. L. T.; MARTINS JÚNIOR, P. P. Análise quanti-qualitativa do estado da degradação de bacia hidrográfica. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 2, p. 351-364, 2017.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, v. 20, p. 137-157, 2007.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, J. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do Rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 3, p. ????, 2005.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; ALVARES, C. A.; RIBEIRO, S.; LEITE, F. P. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

WILLIAMS, J. R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model – A case-history. Philosophical Transactions of the Royal society of London. **Biological Sciences**, v. 329, n. 1255, p. 421–428, 1990.

WILLIAMS, J., BOARDMAN, J., & O'CONNOR, E. Sediment delivery from hillslopes to rivers: a modelling approach. **Hydrological Processes**, v. 14, n. 4, p. 509-527, 2000.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture Handbook, 537, 1978.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland East of rocky mountains**. Washington, DC: Agricultural Handbook. n. 282, 1965.

ZHANG, X.; YUAN, Y.; YE, M.; WANG, H.; LI, P. **Development of an integratedHEC-RAS model for reservoir sedimentation and flushing simulation**. 2018.