



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA – CCCh
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

ANDRÉ LUIS SOUSA MAMEDIO

**MODELO DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO PARA ÁREA AGRÍCOLA EM
DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO NO LESTE MARANHENSE**

**CHAPADINHA – MA
2023**

ANDRÉ LUIS SOUSA MAMEDIO

**MODELO DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO PARA ÁREA AGRÍCOLA EM
DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO NO LESTE MARANHENSE**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharelado ao curso de Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA), campus Chapadinha.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Willame Lopes Carvalho

CHAPADINHA – MA
2023

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Mamedio, André Luis Sousa.

MODELO DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO PARA ÁREA AGRÍCOLA
EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO NO LESTE MARANHENSE /
André Luis Sousa Mamedio. - 2023.
48 f.

Orientador(a): Marcus Willame Lopes Carvalho.

Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do
Maranhão, Chapadinha, 2023.

1. Cobertura vegetal. 2. Degradação do solo. 3. IPF.
4. Modelo de suscetibilidade. 5. Resistência à
penetração. I. Carvalho, Marcus Willame Lopes. II.
Título.

ANDRÉ LUIS SOUSA MAMEDIO

**MODELO DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO PARA ÁREA AGRÍCOLA EM
DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO NO LESTE MARANHENSE**

Monografia submetida ao corpo docente da Universidade Federal do Maranhão / Centro de Ciências de Chapadinha, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Data de aprovação: 14/12/2023

Nota: 10

Aprovado por:

Prof. Dr. Marcus Willame Lopes Carvalho (Orientador)
Professor Adjunto do curso de Engenharia Agrícola - CCCh/UFMA

Prof. Dr. Patrício Gomes Leite (Avaliador)
Professor Adjunto do curso de Engenharia Agrícola - CCCh/UFMA

Me. Eduardo Arouche da Silva (Avaliador)

DEDICATÓRIA

Dedico a toda minha família, a qual gostaria de expressar o meu profundo respeito e gratidão por tudo o que vocês fizeram por mim até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por toda força, sabedoria e discernimento que tem me dado durante toda minha vida, em especial, no âmbito da universidade, onde consegui realizar um sonho de concluir a graduação.

A minha mãe Aurivone da Silva Sousa por toda apoio e incentivo, sem a sua ajuda, eu não teria conseguido superar todos os desafios que encontrei ao longo do caminho. Você sempre esteve lá para me encorajar, me inspirar e me motivar a continuar. Obrigado por ser a minha rocha e por me ajudar a alcançar meus objetivos.

Ao meu tio e padrinho Aurismar da Silva Sousa por toda ajuda financeira desde o início da minha graduação.

Ao meu tio Marcos da Silva Sousa que foi uma peça fundamental durante todo esse período de graduação, nos momentos mais difíceis, mesmo de longe me ajudou sem hesitar.

Ao meu avô por ser minha inspiração de vida, no qual sempre me apoiou, me ajudou e me incentivou a estudar, um homem que sempre fica feliz com minhas conquistas. Serei eternamente grato.

A minha namorada Bia (Ana Beatriz) por está comigo em todos os momentos da minha vida desde o início de nosso namoro, sem você tudo teria sido mais difícil, só tenho a agradecer pelos feitos.

A minha madrinha Driele pelo estímulo a estudar e também por toda ajuda financeira prestada.

A toda a família Veloso, em especial a minha madrinha Rosa e sua irmã Paulinha que foram extremamente importantes no meu início de graduação.

Ao meu orientador Dr. Marcus Willame por todo auxílio, brincadeiras, paciência e conhecimento repassado, e também pelo convite para ser seu bolsista.

As minhas amigas Ana Paula, Cyntia e Suzane por sempre me amparar nos momentos em que precisei. Gratidão sempre.

Aos meus amigos César e Ronaldo pela parceria na graduação, que de certa forma contribuíram para o meu crescimento.

Aos meus amigos Daniel Lobo, Gerson Oliveira, José Esmeraldo e Patrício Leite, por toda a ajuda prestada na coleta de dados deste trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1. Impactos da erosão no solo	15
2.2. Formas de monitoramento da erosão	16
2.3. Processo Hierárquico Analítico (PHA).....	17
2.4. Análise multicritério	18
2.5. Influência da resistência à penetração na erosão	18
2.6. Influência da declividade na erosão	19
2.7. Influência da cobertura vegetal na erosão	20
2.8. Influência do uso do solo na erosão.....	20
3. OBJETIVOS	22
3.1. Objetivo Geral	22
3.2. Objetivos Específicos.....	22
4. METODOLOGIA.....	23
5. RESULTADOS	31
6. CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de risco segundo a declividade.....	24
Tabela 2. Classificação de risco segundo a resistência mecânica à penetração.....	26
Tabela 3. Classificação de risco segundo o Índice de Vegetação (NDVI)	27
Tabela 4. Classificação de risco segundo o uso do solo	28
Tabela 5 -Matriz de comparação pareada entre os fatores de suscetibilidade à erosão	35
Tabela 6. Classificação da suscetibilidade à erosão da área avaliada	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área experimental.	23
Figura 2. Área de realização do experimento.	24
Figura 3 - Distribuição dos pontos amostrais dentro da área experimental.	25
Figura 4 - Leituras da resistência mecânica à penetração na pastagem e na mata nativa.	26
Figura 5. Escala de pontos para a comparação pareada entre os fatores.	29
Figura 6. Mapa do NDVI segundo a classificação de suscetibilidade à erosão.	31
Figura 7. Mapa da declividade segundo a classificação de suscetibilidade à erosão.	32
Figura 8. Resistência mecânica à penetração do solo segundo a classificação de suscetibilidade à erosão.	33
Figura 9 - Uso e ocupação da terra segundo a classificação de suscetibilidade à erosão.	35
Figura 10. Suscetibilidade à erosão para área agrícola com diferentes sistemas de cultivo.	37
Figura 11. Erosão laminar aparente na área de pastagem.	38

LISTA DE SIGLAS

IC	Índice de Consistência
IVs	Índices de Vegetação
ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
MAM	Métodos de Análise Multicritério
MDE	Modelo Digital de Elevações
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
PHA	Processo Hierárquico Analítico
RC	Razão de Consistência
RMPS	Resistência Mecânica à Penetração do Solo
RP	Resistência à Penetração
SAFs	Sistemas Agroflorestais
SIG	Sistema de Informações Geográficas

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo de suscetibilidade à erosão para uma área agrícola localizada no Município de Brejo, MA, utilizando análise multicritério. Utilizou-se mapas digitais de declividade, uso e cobertura da terra, índice de vegetação e resistência mecânica à penetração como parâmetros para elaboração do modelo. O modelo de suscetibilidade à erosão é normalmente associado a áreas extensas, tendo assim necessidade de elaborar o mesmo para pequenas áreas, como propriedades de atividades agropecuárias. Utilizou-se o Processo Hierárquico Analítico (PHA), que realiza comparação pareada, para atribuição dos pesos a cada parâmetro de acordo com sua importância para a suscetibilidade à erosão utilizando o sistema de informação geográfica. A partir dos parâmetros utilizados foi possível a elaboração do modelo de suscetibilidade à erosão. As áreas ocupadas com pastagem apresentaram maior suscetibilidade à erosão em decorrência da maior resistência mecânica à penetração. Observou-se que cerca de 67% da área apresenta baixa declividade, portanto pouco impacto sob a suscetibilidade à erosão. As áreas ocupadas com pastagem apresentaram menores valores de índice de vegetação portanto foram classificadas como mais suscetíveis à erosão, bem como no mapa de uso e ocupação da terra. As áreas de mata nativa foram classificadas com menor risco à erosão em decorrência da maior cobertura vegetal observada no índice de vegetação.

Palavras-chave: Cobertura vegetal; Degradação do solo; IPF; Modelo de suscetibilidade; Relevo; Resistência à penetração; Sistema silvipastoril.

ABSTRACT

This study aimed to develop a model for erosion susceptibility in an agricultural area located in the municipality of Brejo, MA, using a multicriteria analysis. Digital maps of slope, land use and cover, vegetation index, and mechanical penetration resistance were employed as parameters for the model. Erosion susceptibility models are typically associated with extensive areas, thus necessitating adaptation for smaller regions such as agricultural properties. The Analytical Hierarchical Process (AHP) was utilized for paired comparison, assigning weights to each parameter based on its significance in erosion susceptibility using a geographic information system. The model for erosion susceptibility was successfully developed using the specified parameters. Areas occupied by pasture exhibited higher susceptibility to erosion due to increased mechanical penetration resistance. Approximately 67% of the area showed low slope, indicating minimal impact on erosion susceptibility. Pasture areas, characterized by lower vegetation index values, were classified as more susceptible to erosion, consistent with land use and cover maps. Native forest areas were classified with lower erosion risk due to their higher vegetation cover, as observed in the vegetation index map.

KEYWORDS: Vegetation cover; Soil degradation; IPF; Susceptibility model; Relief; Penetration resistance; Silvopastoral system.

1. INTRODUÇÃO

A degradação do solo apresenta uma importância global significativa devido a impactos diversos. Ela compromete a segurança alimentar ao reduzir a capacidade agrícola, afeta recursos hídricos pelo assoreamento e prejudica a qualidade da água. Contribui para as mudanças climáticas ao liberar carbono do solo, impacta a biodiversidade e gera custos econômicos, como reabilitação de terras e perda de produtividade agrícola. Diante desses desafios interconectados, é crucial adotar abordagens sustentáveis para mitigar a erosão do solo (AYER et al., 2015).

De posse do modelo de suscetibilidade à erosão, é possível prever os pontos mais vulneráveis à erosão. No qual um processo (ou grupo de processos) que remove as camadas superficiais de solo e transporta-as através dos agentes erosivos, tais como rios, mares, vento e chuva, principalmente a chuva e o vento nas regiões tropicais. Este processo pode ser agravado pela ação antrópica com a intensificação das práticas agropecuárias sem a utilização de manejo conservacionista tornando o solo mais suscetível aos processos erosivos (FIORESE et al., 2021).

A suscetibilidade à erosão é uma análise do desgaste que a superfície do solo pode sofrer, quando submetida a qualquer uso, sem medidas conservacionistas. Informações sobre os tipos de solo, de suas propriedades e características hidrológicas torna possível fazer previsões sobre a suscetibilidade à erosão. De acordo com Ramalho Filho e Beek (1995) ela está na dependência das condições climáticas, das condições do solo, das condições do relevo e da cobertura vegetal, no qual esses fatores são essenciais para identificar as áreas mais propensas aos processos erosivos.

Com ausência da cobertura vegetal sobre a superfície, há total exposição do solo à erosão hídrica provocada pela água da chuva o que pode ser agravada em área de maior declividade. Além disso, solos de diferentes tipos podem apresentar suscetibilidade diferenciada à erosão, mesmo para condições semelhantes de declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo (DYONISIO, 2010).

Dentre os indicadores mais utilizados, destacam-se a densidade, a porosidade, a resistência mecânica à penetração do solo (RMPS) e a infiltração. Um dos atributos físicos mais adotados como indicativo da compactação do solo tem sido a resistência do solo à penetração (STONE et al., 2002), por apresentar relações diretas com o crescimento das plantas (HOAD et al., 2001) e por ser mais eficiente na identificação

de estados de compactação comparada à densidade do solo (STRECK et al., 2004).

A elaboração dos mapas de suscetibilidade pode ocorrer por meio de duas etapas: elaboração dos planos de informação envolvendo as variáveis que direta ou indiretamente contribuem com os processos erosivos e a elaboração do mapa propriamente dito. Esses dados são manipulados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os SIGs apresentam grande capacidade de processamento, visualização de diferentes temas e integração temática e possibilitam realização de análises e replicação de modelos já existentes (CALDAS et al., 2019).

O desenvolvimento de metodologias e modelagens de análise ambientais associadas às interferências antrópicas como a agricultura, e a ocorrência de processos erosivos geram ferramentas de predição de cenários, medidas de probabilidades ou classificações qualitativas dos terrenos quanto ao grau de suscetibilidade ou vulnerabilidade das áreas para ocorrência dos mesmos (SOUZA et al., 2017).

Atualmente modelos de suscetibilidade à erosão vêm sendo pesquisados, porém estão associados a extensas áreas como nos trabalhos realizados por Lacerda et al., (2021), Caldas et al., (2019), Oliveira e Jesus, et al., (2017); havendo, portanto, a necessidade de avaliar a aplicação destes modelos em áreas menores como propriedades com atividades agropecuárias, portanto, o objetivo deste trabalho é elaborar um modelo de suscetibilidade à erosão para uma propriedade agrícola.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Impactos da erosão no solo

A dinâmica da erosão do solo é um processo cíclico e natural que desempenha um papel importante na transformação da topografia da paisagem. Contudo, a atividade humana intensa, que resulta do uso extensivo da terra, está perturbando continuamente esse equilíbrio natural, causando um aumento na perda de componentes do solo. Essa interferência humana é conhecida como erosão acelerada, e atualmente representa um sério desafio tanto do ponto de vista ambiental quanto agrícola (SANTOS; CALDAS; SILVA, 2019).

A erosão do solo é resultado, principalmente, da influência de vários fatores determinantes, que incluem a intensidade da chuva, a suscetibilidade do solo à erosão, as características topográficas da área e a presença de vegetação (SANTOS; GUERRA, 2021). Adicionalmente, é válido mencionar inúmeros outros elementos que podem agravar ou mitigar o processo de erosão, tais como métodos de manejo do solo, estratégias de conservação e preservação, eventos de desastres naturais, variações climáticas e uma série de outros fatores que exercem influência direta ou indireta nas etapas da erosão (SOUSA; PAULA, 2019).

A degradação dos solos agrícolas no Brasil encontra na erosão hídrica um de seus principais desafios. Este fenômeno refere-se a um processo no qual a água da chuva incide diretamente com o solo e a enxurrada flui superficialmente, resultando em diversos fatores, tais como desagregação, transporte e deposição de partículas de solo, nutrientes e matéria orgânica (DECHEN et al., 2015).

Em áreas onde a intensidade da chuva é alta e o solo não está protegido por vegetação, pode ocorrer um considerável desgaste, levando a perdas expressivas dos elementos citados anteriormente, que são cruciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Essas perdas de solo e seus componentes podem resultar em impactos ambientais, como o assoreamento e a eutrofização de corpos d'água, ao mesmo tempo em que causam prejuízos econômicos tanto para os agricultores quanto para a sociedade em geral (CARDOSO et al., 2012).

Dentro da erosão hídrica, tem-se a erosão laminar que segundo Matos de Carvalho et al. (2019) é provocada quando uma gota de água atinge o solo e começa a escoar, na qual ela tem a capacidade de gradualmente deslocar partes das camadas superficiais do solo, o que resulta em diversos tipos de danos, onde a detecção

precoce desses danos desempenha um papel fundamental nas ações de prevenção de desastres, ainda que que ainda não seja possível detectar erosões em andamento, é viável utilizar simulações com o auxílio de tecnologias geoespaciais para identificar as áreas que apresentam maior vulnerabilidade a esse tipo de ocorrência.

Existem diversas técnicas de manejo para mitigar a erosão do solo, segundo Guerra et al. (2014) as medidas eficazes de preservação do solo abrangem a implementação de boas práticas de manejo, como o cultivo mínimo, a adoção do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), o reflorestamento nas áreas próximas aos cursos d'água, a prática de cultivos em curva de nível, entre outras. Todas essas estratégias de conservação contribuem para uma agricultura mais sustentável, resultando na melhora da drenagem do solo e simultânea redução da erosão.

A adubação verde e a utilização de cobertura morta, representam opções econômicas e eficazes para reduzir o escoamento superficial, promover a infiltração de água no solo, aumentar a umidade do terreno e impulsionar a produtividade agrícola (ABRANTES; LIMA; MONTENEGRO, 2015).

2.2. Formas de monitoramento da erosão

O sucesso de uma exploração equilibrada de recursos da natureza depende, principalmente, do monitoramento de variáveis causadoras de erosão do solo como precipitação, solo, uso e cobertura da terra, declividade, entre outros (GOMES et al., 2021).

De acordo com Santos e Nascimento (2021), o geoprocessamento envolve técnicas matemáticas e computacionais para manipular e analisar dados georreferenciados, gerando modelos diagnósticos e prognósticos para ambientes naturais e modificados pela ação humana. Essas técnicas são cruciais na integração de mapas temáticos, sendo uma ferramenta essencial para estudos avançados do ambiente, incluindo a técnica de análise da suscetibilidade à erosão do solo. A avaliação da suscetibilidade é realizada por meio de SIG, os quais integram dados, metodologias, equipamentos e colaboradores com o propósito de coletar, armazenar, recuperar, manusear, observar e analisar dados espacialmente georreferenciados em um sistema de coordenadas conhecido. Nesse sentido, as técnicas de sensoriamento remoto aplicadas aos processamentos digitais de imagens contribuem para a avaliação e o monitoramento dos elementos físicos e antrópicos.

De acordo com Cunha et al. (2018), a elaboração e utilização de modelos em pesquisas sobre erosão têm se consolidado como uma ferramenta amplamente empregada para delimitar e mapear regiões com diferentes níveis de suscetibilidade à erosão. Isso promove a identificação de áreas mais ou menos propensas a esse fenômeno, contribuindo para a elaboração de zonamentos ambientais e, conseqüentemente, aprimorando o planejamento ambiental.

No trabalho de Agra e Andrade (2021) foi possível identificar a criação de modelo de suscetibilidade à erosão utilizando SIG, no qual foi possível identificar as áreas em que são mais suscetíveis à erosão, porém, para escala pequena, ou seja, uma abrangência maior de área.

2.3. Processo Hierárquico Analítico (PHA)

De acordo com o trabalho de Pimenta et al. (2019), ao analisar questões para a tomada de decisão, as informações provenientes da coleta de dados resultam em um grande número de variáveis ou atributos que, durante o processo de avaliação, demandam critérios aos quais são atribuídos pesos e valores. Dessa forma, se estabelece uma hierarquia na qual, com o intuito de simplificar a tomada de decisão, são priorizados aqueles que possuem maior peso e significância. Então, a fim de fornecer suporte à tomada de decisão, permitindo a análise comparativa de fatores ou atributos, bem como a avaliação de múltiplos cenários, surgiram, a partir da década de 1960, os Métodos de Análise Multicritério (MAM). Essas abordagens são amplamente empregadas na análise comparativa de projetos alternativos ou em situações envolvendo múltiplos objetivos.

Segundo Gdoura, Anane e Jellali (2014), um dos escassos métodos de tomada de decisão que pode ser incorporado com facilidade a um SIG é, o processo hierárquico analítico. Esse procedimento analítico contém elementos que têm a capacidade de avaliar as potencialidades ou restrições inerentes ao processo decisório, contribuindo de maneira positiva para a implementação de ações (REZENDE; MARQUES; OLIVEIRA, 2017; PIMENTA et al., 2019).

Idealizado por Thomas L. Saaty em meados da década de 1970, o PHA consiste em um modelo que reflete o funcionamento da mente humana na avaliação das alternativas diante de um problema de decisão complexo, permitindo lidar com problemas que envolvem tanto os valores tangíveis como os intangíveis, graças a sua capacidade de criar medidas para as variáveis qualitativas com base em julgamentos

subjetivos emitidos pelos decisores (DOTTO; GABERTI; ROBAINA, 2023). O PHA baseia-se em três princípios: estruturação hierárquica, julgamentos comparativos, ou seja, construção da matriz, verificação da consistência e pesos relativos; e ainda síntese de prioridades, na qual acontece a padronização das alternativas e classificação final (SANTOS; NASCIMENTO; BARROS, 2020).

Com relação aos processos erosivos especificamente, podem ser citados os trabalhos de alguns pesquisadores que têm contribuído significativamente para o entendimento desse método como, Domazetović et al. (2019) e Saha et al. (2019).

2.4. Análise multicritério

A análise multicritério é uma abordagem que permite a consideração e avaliação de múltiplos critérios ou fatores relevantes em processos de tomada de decisão. Ela é utilizada para lidar com situações em que há a necessidade de ponderar diferentes aspectos ou objetivos, muitas vezes conflitantes, a fim de chegar a uma decisão que leve em conta todas as variáveis relevantes (DE SOUZA; DE OLIVEIRA; DE SOUZA, 2023).

Como no estudo de Listo e Xavier (2017), a análise multicritério foi utilizada para combinar parâmetros morfológicos, litologia, tipos de solos e uso da terra, a fim de gerar mapas de suscetibilidade à erosão. Essa abordagem permite uma avaliação mais abrangente e integrada dos fatores que influenciam a ocorrência de processos erosivos, auxiliando na identificação de áreas com maior potencial de erosão e no planejamento de medidas preventivas e de controle.

Já no trabalho de Carvalho, Dornas e Benvenuto (2017), foram utilizadas as variáveis geologia, macha urbana, pluviosidade, declividade e densidade populacional para a análise multicritério, essas variáveis foram selecionadas com base em sua relevância para compreender e avaliar a suscetibilidade a movimentos de massa na região estudada.

2.5. Influência da resistência à penetração na erosão

Um dos parâmetros físicos do solo frequentemente empregados para detecção de compactação do solo é a Resistência à Penetração (RP), devido à sua facilidade de medição e à sua relação direta com o crescimento das plantas, além de apresentar maior eficácia na identificação de estados de compactação em comparação com a densidade do solo. A RP do solo é uma característica dinâmica que reflete a resposta do solo quando submetido à ação de uma força exercida por meio de uma ponteira

cônica. Essa característica pode ser afetada pela densidade do solo, pelo teor de água e pelo tipo de solo. Em geral, a resistência do solo aumenta com o aumento da densidade e diminui à medida que o teor de água no solo é elevado (DUARTE et al., 2022).

Uma das principais razões para a degradação do solo é a compactação, que é influenciada por vários fatores, como o manejo do solo, que envolve o tráfego pesado de máquinas e equipamentos durante a preparação, bem como a textura do solo, a quantidade de umidade e a presença de matéria orgânica, entre outros elementos. A compactação do solo se manifesta principalmente pelo aumento da densidade, resultante da aplicação de cargas ou pressão sobre o solo. Isso, por sua vez, está diretamente relacionado à umidade do solo, levando à redução da porosidade à medida que o ar e/ou a água são parcialmente expulsos devido à compressão do solo. Esse processo resulta no aumento da resistência à penetração das raízes das plantas, o que, dependendo da intensidade, pode criar condições que limitam o crescimento e a produção das culturas. Em resumo, a compactação afeta as propriedades físicas do solo ao longo de todas as etapas do desenvolvimento das plantas, desde a germinação até o crescimento das raízes e da parte aérea (MIOTO et al., 2020).

2.6. Influência da declividade na erosão

Existem elementos inerentes ao ambiente que podem facilitar a erosão, como a topografia do terreno. É importante observar áreas com inclinação acentuada, pois podem tornar fenômenos como o escoamento superficial mais propensos a causar erosão (BORRELLI et al., 2020; GIL; KIJOWSKA-STRUGAŁA; DEMCZUK, 2021; WU et al., 2021; ZHANG et al., 2019).

Stefanuto et al. (2022) reforçam a teoria de que a declividade de um terreno tem relação direta com o escoamento superficial, portanto, a capacidade erosiva do escoamento superficial é influenciada pela intensidade e volume das chuvas, bem como pela declividade e cobertura do solo.

De acordo com Amorim et al. (2001), a declividade provoca o aumento do processo erosivo no solo, e a medida que a inclinação do terreno aumenta esse processo pode ser intensificado e, o tipo de solo é mais um fator condicionante para essa intensificação, pois a depender da textura, esse solo pode ser ou não mais propenso a erosão. Isso pode levar a danos que não podem ser corrigidos, afetando não apenas a fertilidade do solo, que é crucial para a agricultura mas também

alterando a própria forma física do terreno, essas mudanças no terreno podem ter implicações significativas, incluindo a alteração dos padrões de escoamento de água (SILVA; DE MARIA, 2011).

2.7. Influência da cobertura vegetal na erosão

Conforme Pinheiro et al. (2018) a presença de cobertura vegetal é uma das características que influenciam diretamente nos processos de infiltração e escoamento da água, na qual, é de grande importância no processo de percepção da precipitação, reduzindo o escoamento, pois a presença da vegetação atua como uma barreira física que dispersa o fluxo de água, aumentando assim o tempo disponível para a água se infiltrar no solo. Isso resulta em uma redução na perda de solo e diminui o escoamento superficial.

A diminuição da vegetação pode levar a um aumento na possibilidade de perda de solo por erosão, o que consequentemente reduz a quantidade de nutrientes e matéria orgânica. Isso é particularmente notável no início do período de chuvas, quando o solo, exposto a elementos como radiação, temperatura, ventos e chuva, está mais suscetível. Além disso, a falta de cobertura vegetal pode aumentar a perda de água por evaporação e evapotranspiração (MENDES, 1997).

Almeida et al. (2016) reforçam que áreas que passam pelo preparo convencional do solo e que não possuem cobertura vegetal na superfície são mais propensas à erosão hídrica. Isso ocorre porque esse sistema de preparo do solo favorece a formação de uma camada superficial selada, que é uma fina camada de solo que se compacta devido ao impacto direto da gota de chuva no solo. Porém, em práticas conservacionistas como o plantio direto e a pastagem sob manejo adequado, onde há um pequeno ou nenhum revolvimento do solo, mantendo a cobertura vegetal sobre a superfície, favorece a formação de agregados maiores e mais estáveis, proporcionando uma maior resistência do solo à erosão. A cobertura do solo é um dos fatores mais importantes na dissipação de energia de impacto das gotas de chuva.

Sousa et al. (2016) enfatizam em sua pesquisa que a cobertura vegetal desempenha um papel crucial na degradação ambiental associada à erosão.

2.8. Influência do uso do solo na erosão

Um dos elementos que afetam a perda de solo é a forma como ele é usado e manejado, bem como a proteção que é dada à terra. Solos que não têm uma cobertura adequada sofrerão as consequências desse uso inadequado. A erosão é exacerbada

por mudanças rápidas na cobertura vegetal e pelo tipo de manejo das culturas, e sua dinâmica está ligada às atividades humanas. A cobertura do solo é extremamente importante na prevenção e controle da erosão e na mitigação dos efeitos do processo erosivo. O uso e a ocupação não planejados de um solo em uma determinada área podem afetar seu desempenho em relação ao processo erosivo, comprometendo a infiltração de água no solo, danificando sua estrutura e causando a perda de sedimentos, entre outros problemas (RUTHES; TOMAZONI; GOMES, 2016).

A utilização de resíduos de culturas para cobrir o solo é uma estratégia eficaz no combate à erosão hídrica. Essa cobertura ajuda a dissipar a energia cinética das gotas de chuva, impedindo que elas atinjam o solo diretamente e desagreguem suas partículas. Isso não só reduz o volume de água da enxurrada, mas também diminui a velocidade do escoamento superficial, reduzindo assim a energia necessária para desagregar e transportar sedimentos. Além disso, os resíduos de culturas capturam os sedimentos nos espaços entre eles, o que diminui o tamanho médio dos agregados transportados pelo escoamento superficial, resultando em uma redução na perda de solo (RAMOS et al., 2014). Há também os sistemas agroflorestais (SAFs) que são sistemas de uso da terra que combinam árvores, culturas agrícolas e/ou criação de animais de forma simultânea ou sequencial, visando benefícios econômicos, sociais e ambientais. Eles podem ser divididos em diferentes tipos, como SAFs multiestrato, SAFs silvipastoris, SAFs agrossilvipastoris, entre outros. Os sistemas agroflorestais podem ajudar a reduzir a erosão do solo, pois a presença de árvores e outras plantas perenes ajuda a proteger o mesmo da ação direta da chuva e do vento, além de melhorar a infiltração de água no solo e aumentar a matéria orgânica. Além disso, a adoção de práticas agroflorestais pode ajudar a reduzir a necessidade de arar o solo, o que também pode contribuir para a redução da erosão (VASCONCELLOS; BELTRÃO, 2018).

Além disso, o consórcio de culturas também é capaz de dissipar a energia cinética da gota de chuva, minimizando o processo erosivo, ou seja, o consórcio pode aumentar a eficiência na redução da perda de solo. Sendo assim uma estratégia importante para o manejo sustentável do solo e para a redução da erosão hídrica além de manter o controle de plantas daninhas (LIMA et al., 2015).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Elaborar um modelo de suscetibilidade à erosão para uma área agrícola localizada no Município de Brejo, MA, utilizando análise multicritério.

3.2. Objetivos Específicos

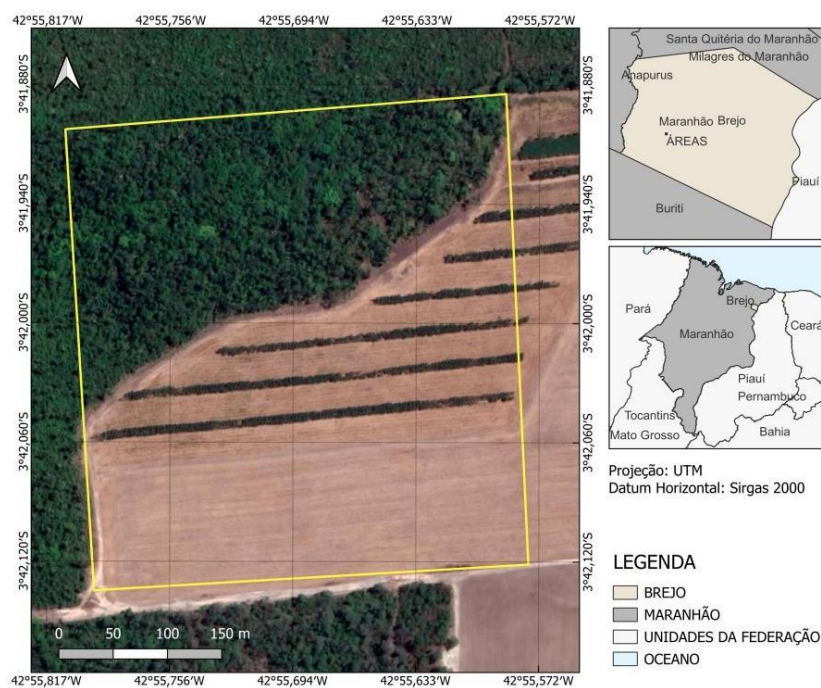
- Elaborar os mapas de resistência mecânica à penetração do solo e declividade, uso e ocupação da terra e índice de vegetação.
- Identificar pontos das regiões com maior suscetibilidade à erosão em diferentes sistemas de cultivo.
- Classificar os parâmetros analisados de acordo com sua influência na suscetibilidade à erosão.

4. METODOLOGIA

O trabalho foi realizado na Fazenda Barbosa, localizada na em Brejo, MA, região nordeste do estado do Maranhão. A região é caracterizada pelo grande avanço da agricultura nos últimos anos. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical quente e úmido (Aw), com temperatura média anual superior a 27 °C e precipitação pluvial média anual de 1835 mm, com períodos de chuva entre os meses de janeiro e junho e de seca de julho a dezembro; a umidade relativa do ar anual fica entre 73 e 79%. As altitudes variam bastante, possui relevo ondulado a suave ondulado (MARANHÃO, 2002).

A área selecionada apresenta diferentes sistemas sendo eles: mata nativa, sistema em integração silvipastoril e pastagem (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização da área experimental.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 2. Área de realização do experimento.



Fonte: autoria própria (2023).

Os dados referentes à declividade do terreno foram obtidos a partir do modelo digital de elevações - MDE, disponibilizado no site do Projeto TOPODATA (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/dados.php>), após as imagens baixadas, as mesmas foram transferidas para software QGIs (LEAL et al., 2019), no qual foi feito o recorte para a área desejada e então desenvolvido o mapa de declividade. Em seguida foi proposta uma classificação de risco de erosão considerando uma área reduzida (Tabela 1), onde estes riscos se referem ao quanto determinada área está suscetível a sofrer um processo erosivo. Sendo as áreas mais declivosas, mais suscetíveis a erosão.

Tabela 1 - Classificação de risco segundo a declividade

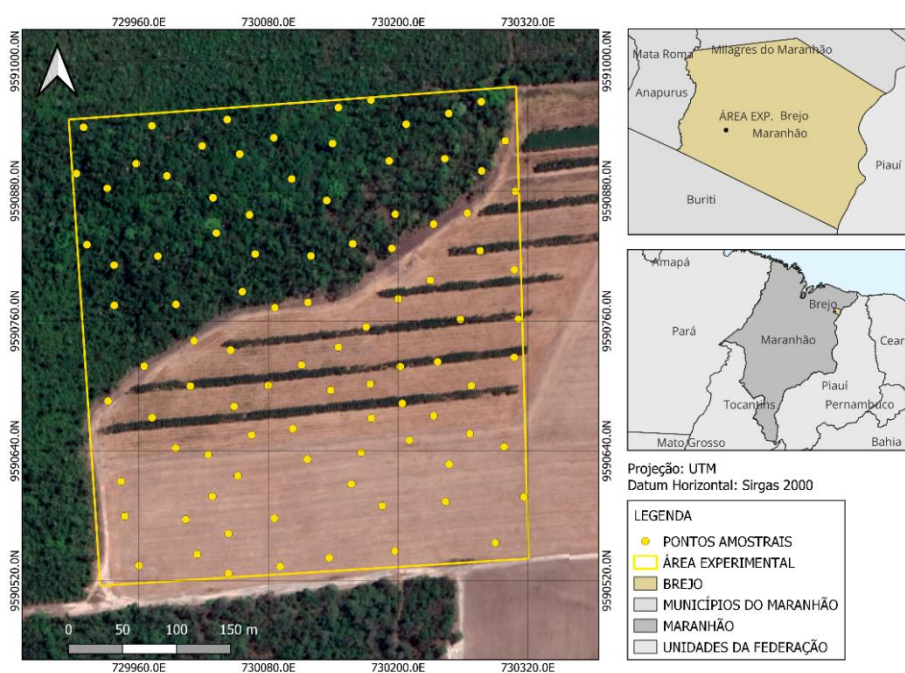
PESO	CLASSES	RISCO
1	0 a 3%	Baixo
2	3 a 6%	Médio
3	6 a 9%	Alto

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Para a aquisição dos dados de resistência à penetração, foi realizada a amostragem por pontos utilizando o software QGIs versão 3.28.11, sendo amostrados

95 pontos espaçados a uma distância mínima de 30 metros. Utilizou-se um penetrômetro digital FALKER, modelo PenetroLOG–PLG 1020, com aptidão eletrônica para aquisição de dados. O penetrômetro foi configurado para registrar leituras a cada 0,1 m de incremento de profundidade, trabalhando em velocidade de penetração constante, sendo determinada a profundidade máxima de 0,4 m.

Figura 3 - Distribuição dos pontos amostrais dentro da área experimental.



Fonte:

Elaborado pelo autor (2023).

Os dados referentes ao penetrômetro foram extraídos da memória digital e analisados a uma profundidade máxima, já antes mencionada. Para o processamento dos dados de resistência à penetração, foi utilizado o Software Falker Compact. Com o auxílio do software QGIS versão 3.28.11 os dados foram interpolados utilizando a Krigagem para elaboração do mapa de resistência a penetração. Em seguida foi proposto uma classificação de risco de erosão pra resistência à penetração (Tabela 2), no qual o risco compreende que áreas com maiores compactações apresentem maior suscetibilidade à erosão.

Tabela 2. Classificação de risco segundo a resistência mecânica à penetração

PESO	CLASSES	RISCO
1	0,0 a 0,5 MPa	Muito Baixo
2	0,5 a 1,0 MPa	Baixo
3	1,0 a 1,5 MPa	Médio
4	1,5 a 2,0 MPa	Alto
5	2,0 a 2,5 MPa	Muito Alto

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Figura 4 - Leituras da resistência mecânica à penetração na pastagem e na mata nativa.



Fonte: autoria própria (2023)

Para a determinação do índice de vegetação por diferença normalizada utilizou-se as bandas do satélite SENTINEL-2A, disponíveis gratuitamente na Plataforma Sentinel Hub (sentinel-hub.com), com correção atmosférica e valores convertidos para reflectância na superfície, um processo crucial para o cálculo de índices de vegetação (IVs) (OLIVEIRA et al., 2021). E com auxílio da ferramenta calculadora raster do *software* QGIS, determinou-se o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), que é calculado pela diferença entre as bandas B8 e B4 que correspondem, respectivamente, ao Infravermelho Próximo e Vermelho, normalizada pela soma das

mesmas bandas, de acordo com a Equação 1 (OLIVEIRA; AQUINO, 2020):

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad \text{Equação 1.}$$

Sendo:

NDVI - valor do índice de vegetação da diferença normalizada

IVP - valor da reflectância na faixa do infravermelho próximo

V - valor da reflectância na faixa do vermelho

O fator referente ao índice de vegetação foi determinado com base no vigor vegetativo pela interpretação da escala de valores variando de -1 a 1. Em seguida o mapa foi reclassificado de acordo com o risco de cada classe (Tabela 3), onde o risco referente ao índice de vegetação compreende que as áreas com maior densidade vegetal sejam menos suscetíveis à erosão.

Tabela 3. Classificação de risco segundo o Índice de Vegetação (NDVI)

PESO	CLASSES	RISCO
1	0,0 a 0,25	Alto
2	0,25 a 5	Médio
3	0,5 a 0,75	Baixo
4	0,75 a 1	Muito Baixo

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para elaboração do mapa de uso do solo utilizou-se imagens originadas do satélite SENTINEL-2A. Foram utilizadas as bandas RGB que compreendem as bandas B2, B3 e B4, as quais no comprimento de onda correspondem, respectivamente, ao azul, verde e vermelho. Utilizado o *software* QGis, para realização das mesclagem das bandas e a partir da imagem gerada, o fator referente ao uso e cobertura do solo foi obtido por meio da interpretação visual das imagens, onde foram vetorizados polígonos sobre cada classe de uso representante. Em seguida, o mapa foi reclassificado de acordo com o risco que cada classe possui (Tabela 4).

Tabela 4. Classificação de risco segundo o uso do solo

PESO	CLASSES	RISCO
1	Mata nativa	Baixo
2	Integração Silvipastoril	Médio
3	Pastagem	Alto

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após a elaboração dos planos dos mapas temáticos, foi realizada a normalização dos critérios ainda em ambiente SIG (QGIS versão 3.28.11). Este processo permite que valores de critérios não comparáveis entre si sejam normalizados para uma mesma escala, viabilizando a agregação entre eles. A maior parte dos processos de normalização utiliza o valor máximo e mínimo para a definição de uma escala. A forma mais simples é uma variação linear definida pela Equação 2 (EASTMAN, 1997).

$$xi = \frac{R_i - R_{mín}}{R_{máx} - R_{mín}} * IntervaloNormalizado \quad \text{Equação 2.}$$

Onde: R_i : é o valor a ser normalizado; $R_{mín}$: valor mínimo para o critério; $R_{máx}$: valor máximo para o critério

O mapa de suscetibilidade à erosão foi obtido a partir dos planos criados anteriormente. O modelo foi desenvolvido utilizando o software QGIS 3.28.11 a partir da sobreposição de mapas, utilizando a calculadora raster.

Os dados raster de entrada foram ponderados pela importância e somados para produzir um raster de saída. Para cada raster de entrada ponderou-se uma percentagem tendo como base a sua importância para o modelo. A soma dos valores ponderados para todos os mapas raster somam obrigatoriamente 100%. Os valores das células de cada pixel dos rasters de entrada foram multiplicados pelo valor ponderado que lhe foi atribuído. Os valores das células resultantes são somados para produzir o resultado, ou seja, o modelo neste caso de suscetibilidade à risco de incêndio (PEDROSA; ROCHA, 2012).

Para a atribuição de pesos aos fatores utilizou-se o Processo Hierárquico Analítico (PHA), proposto por Wind e Saaty (1980). O PHA faz uma comparação pareada entre cada um dos fatores, para determinar a importância que cada um

possui, por meio de uma matriz quadrada em que os fatores são analisados em pares. Dessa forma, cada uma das células da matriz é preenchida com um valor de julgamento que expressa a importância relativa entre pares de fatores (NICOLETE; ZIMBACK, 2013). Os valores então são derivados de uma escala contínua de nove pontos (Figura 5).

Figura 5. Escala de pontos para a comparação pareada entre os fatores.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremamente	Muito fortemente	Fortemente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Fortemente	Muito fortemente	Extremamente

Fonte: Adaptado de Nicolete e Zimback (2013).

A partir da utilização do PHA proposto foi possível elaborar a matriz de comparação pareada e determinar os pesos de cada fator, bem como a taxa de consistência para a matriz.

Em razão da inconsistência, que é um fator inerente ao ser humano e por isso deve haver uma tolerância dentro de certos parâmetros para a sua aceitação, Saaty & Vargas (2001) propõem o cálculo do Índice de Consistência (IC) na equação 3:

$$IC = \frac{|\lambda_{\text{máx}} - n|}{(n - 1)} \quad \text{Equação 3.}$$

onde n representa a ordem da matriz e $\lambda_{\text{máx}}$ o estimador de autovalor máximo de julgamentos paritários.

A fórmula para o cálculo do estimador de autovalor máximo é dada pela equação 4:

$$\lambda_{\text{máx}} = T \cdot w \quad \text{Equação 4.}$$

onde T é o somatório das colunas das matrizes e (w) é o autovetor normalizado para $\sum w_i = 1$.

A fim de permitir a avaliação da inconsistência em função da ordem máxima da matriz de julgamento, Saaty & Vargas (2001) utilizam a Razão de Consistência (RC). Onde o RC é obtido através da equação 5:

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

Equação 5.

onde IR é um índice randômico de consistência obtido para uma matriz recíproca, com elementos não negativos gerados de forma randômica sendo adotado $IR = 1,32$.

De acordo com Alves e Alves (2015), os julgamentos da matriz de decisão são considerados consistentes se: $RC = 0$ para $n = 2$, $RC < 0,05$ para $n = 3$, $RC < 0,09$ para $n = 4$ e $RC \leq 0,10$ para $n > 4$. Caso contrário, existe alguma inconsistência nos julgamentos devendo-se haver uma reavaliação.

A partir da utilização do PHA proposto elaborou-se a matriz de comparação pareada e determinou-se os pesos de cada fator, bem como a taxa de consistência para a matriz.

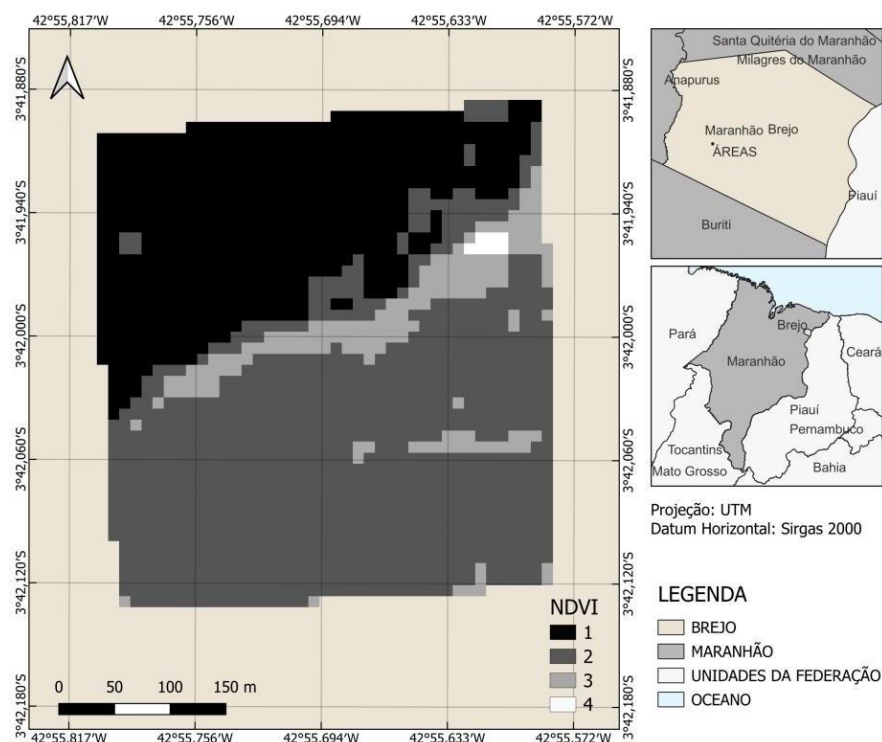
A partir dos resultados foi gerado o modelo de suscetibilidade à erosão a partir da integração dos atributos e respectivos índices calculados pelo método PHA. Utilizando a calculadora raster, ferramenta do software QGIS, elaborou-se o mapa para representação do modelo.

5. RESULTADOS

A preservação das áreas propensas à erosão é uma questão crítica para a sustentabilidade ambiental, com implicações diretas na conservação do solo e na mitigação dos impactos causados por fenômenos erosivos.

As áreas de risco de erosão segundo o índice de vegetação podem ser observadas na figura 6. Observa-se que a área correspondente à mata nativa, com característica vegetação mais densa, apresenta menor suscetibilidade à erosão, na qual seu índice de vegetação está entre 0,5 e 1, ou seja, riscos variando entre baixo e muito baixo. A cobertura vegetal auxilia na redução da erosão hídrica interceptando as gotas de chuva que impactariam diretamente a superfície do solo. Como consequência há uma diminuição na energia cinética da chuva causada pelo impacto da gota de água, na desestruturação, no selamento superficial do solo e na velocidade da enxurrada, aumentando a infiltração de água no solo (LIMA et al., 2013).

Figura 6. Mapa do NDVI segundo a classificação de suscetibilidade à erosão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

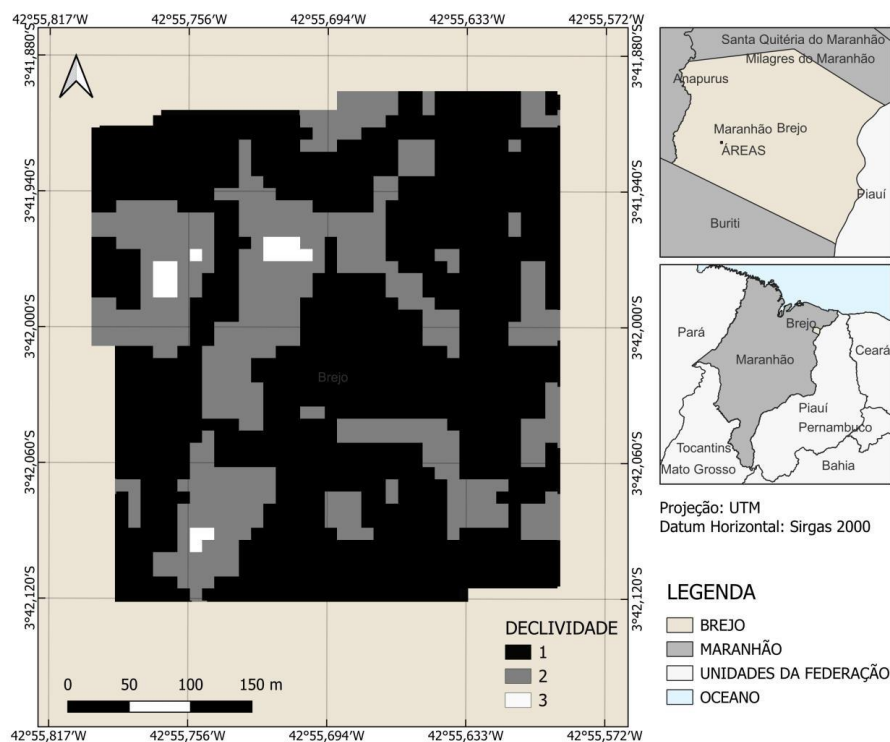
De acordo com Benedito (2001) a preservação da cobertura florestal também traz diversos outros benefícios ao homem, dentre eles, promove a conservação da biodiversidade, gera benefícios sociais, fornece inimigos naturais contra pragas e doenças no cultivo agrícola, atenua mudanças climáticas, e consequentemente, os

seus efeitos, ajuda a controlar as enchentes, entre outros.

Na área de transição entre a integração silvipastoril e a mata nativa observa-se uma maior suscetibilidade à erosão em decorrência da pouca ou ausência total de vegetação no local, tendo assim valor de índice de vegetação 0, ou próximo deste.

A figura 7 mostra as áreas com maior risco de erosão segundo a declividade. Observa-se que a maior parte da área se encontra em baixo risco de suscetibilidade, cerca de 67,74% da área apresenta declividade entre 0 e 3%. A área analisada apresenta declividade máxima de 7% sendo identificada em poucos pontos, indicando que apenas 1,16% com valores, de acordo com classificação de risco, variando entre 6 a 9%, correspondendo a áreas com alto risco de erosão.

Figura 7. Mapa da declividade segundo a classificação de suscetibilidade à erosão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A figura 8 demonstra as áreas com maior risco de erosão segundo a resistência mecânica à penetração. Observa-se que as áreas correspondentes ao risco alto e muito alto correspondem a 34,98% do total aos quais compreendem os valores de 1,5 a 2,5 megapascal (MPa). Estes pontos de maior risco abrangem a maior parte da área cultivada apenas com a pastagem.

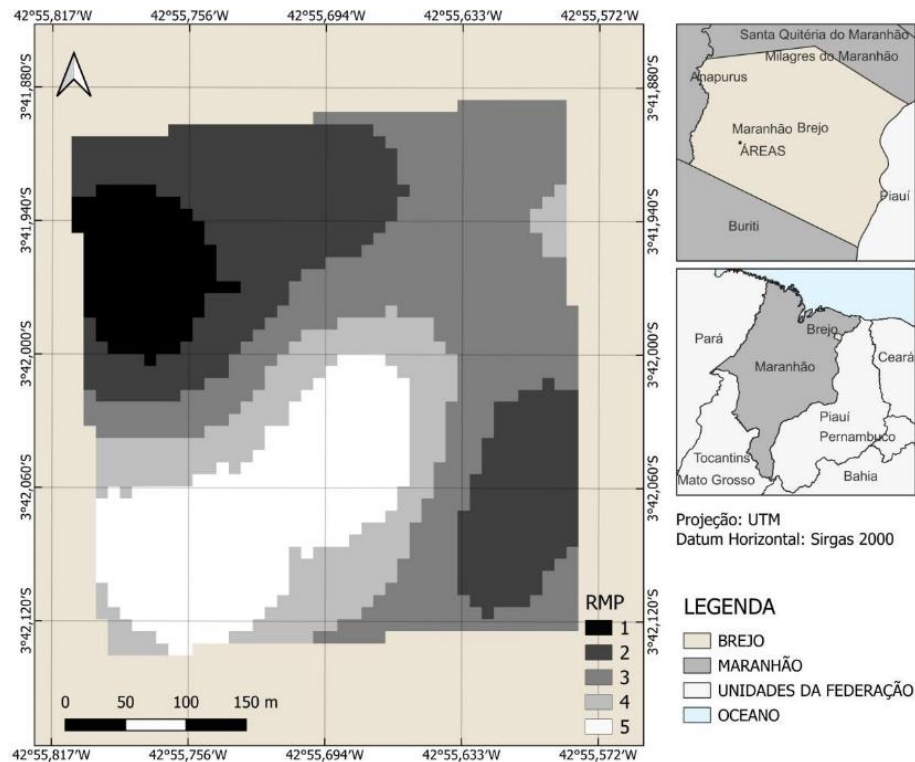
De acordo com Debiasi e Franchini (2012), o comportamento da RMPS em

profundidade está relacionado com a pressão de pastejo, de modo que pouca carga animal resulta no aumento da compactação até 0,1 m e maior carga animal resulta no aumento da compactação a partir dos 0,1 m. Outro aspecto que influencia nos maiores valores de RMPS, em áreas com lavouras temporárias e permanentes, é a presença de um sistema radicular mais desenvolvido na profundidade de 0 à 15 cm como é o caso das pastagens (CORREA et al., 2014),

Pode-se observar que há também uma alta resistência à penetração dentro de uma parte do sistema de integração silvipastoril, onde esta pode ter ocorrido devido ao pisoteio dos animais.

No trabalho disposto por Kunz et al. (2013), a compactação do solo está diretamente relacionada com o pisoteio dos animais, o que pode afetar significativamente a produtividade das culturas, onde o pisoteio animal pode aumentar a densidade do solo, reduzir a porosidade total e macroporosidade, e aumentar a resistência à penetração, além disso, a compactação superficial causada pelo pisoteio dos animais pode reduzir a infiltração de água no solo, favorecendo o escoamento superficial.

Figura 8. Resistência mecânica à penetração do solo segundo a classificação de suscetibilidade à erosão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A figura 9 demonstra as áreas com diferentes usos da terra. Por tratar-se de uma área agropecuária pequena observou-se apenas três sistemas de produção, correspondentes a mata nativa sendo classificada como uma área com baixa suscetibilidade à erosão, o sistema com integração silvipastoril classificada como média suscetibilidade à erosão e a pastagem como alta suscetibilidade.

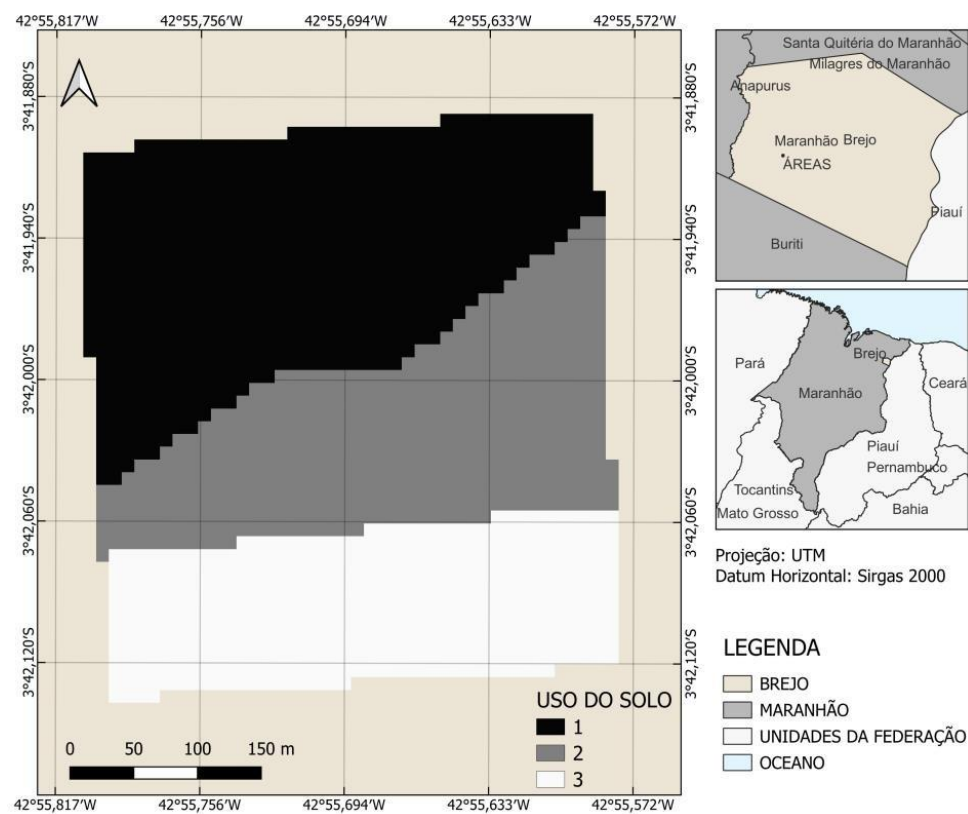
De acordo com o trabalho de Pinto et al. (2020) dentro dos parâmetros analisados, a mata nativa apresentou a menor taxa de perda de solo devido à densa cobertura vegetal dessa classe de uso. Indicando que a cobertura vegetal, como a mata nativa, pode ajudar a reduzir as taxas de perda de solo por erosão hídrica.

Conforme Wendling et al. (2021), as copas das árvores atuam reduzindo o impacto direto da chuva sobre o solo e a velocidade dos ventos, o que contribui para a conservação do solo e a redução da erosão, além disso, os resíduos vegetais das árvores, quando depositados no solo, oferecem proteção adicional contra a erosão, contribuindo para a manutenção da umidade e a melhoria da qualidade do solo. Portanto, o sistema silvipastoril é uma alternativa interessante para áreas sujeitas a processos de erosão, como as regiões montanhosas, contribuindo para a sustentabilidade da pecuária e a conservação do meio ambiente.

No trabalho de Jesuz e Cabral (2019), eles analisaram a erosão em áreas de

pastagem na bacia hidrográfica do Rio Tenente Amaral e foi possível contemplar a relação da pastagem com a erosão laminar, onde a pastagem contribuiu para o deslocamento de material superficial, com a areia sendo o material mais significativamente deslocado.

Figura 9 - Uso e ocupação da terra segundo a classificação de suscetibilidade à erosão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A partir da metodologia proposta para a utilização do PHA, foi obtido a matriz de comparação pareada e determinado os pesos de cada fator, assim como a taxa de consistência para a matriz (Tabela 5).

Tabela 5 -Matriz de comparação pareada entre os fatores de suscetibilidade à erosão

FATORES	US	NDVI	DV	RMPS	PESOS
---------	----	------	----	------	-------

US	1,00	1,00	0,20	0,11	0,061
NDVI	1,00	1,00	0,14	0,14	0,060
DV	5,00	7,00	1,00	0,33	0,352
RMPS	9,00	7,00	3,00	1,00	0,527
RC = 0,04					

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Onde: US: Uso do solo; NDVI: Índice de vegetação; DV: Declividade; RMPS: Resistência mecânica a penetração do solo; RC: Razão de consistência.

A partir destes resultados foi gerado a equação do modelo com a integração dos atributos avaliados e respectivos índices calculados com base no método PHA, conforme equação 6:

$$\text{RISCO} = 0,061 \text{ US} + 0,060 \text{ NDVI} + 0,352 \text{ DV} + 0,527 \text{ RMPS}$$

Equação 6.

Na tabela 6 nota-se que foram atribuídos riscos às determinadas classes de suscetibilidade à erosão variando de 1 (muito baixo) a 5 (muito alto).

Tabela 6. Classificação da suscetibilidade à erosão da área avaliada

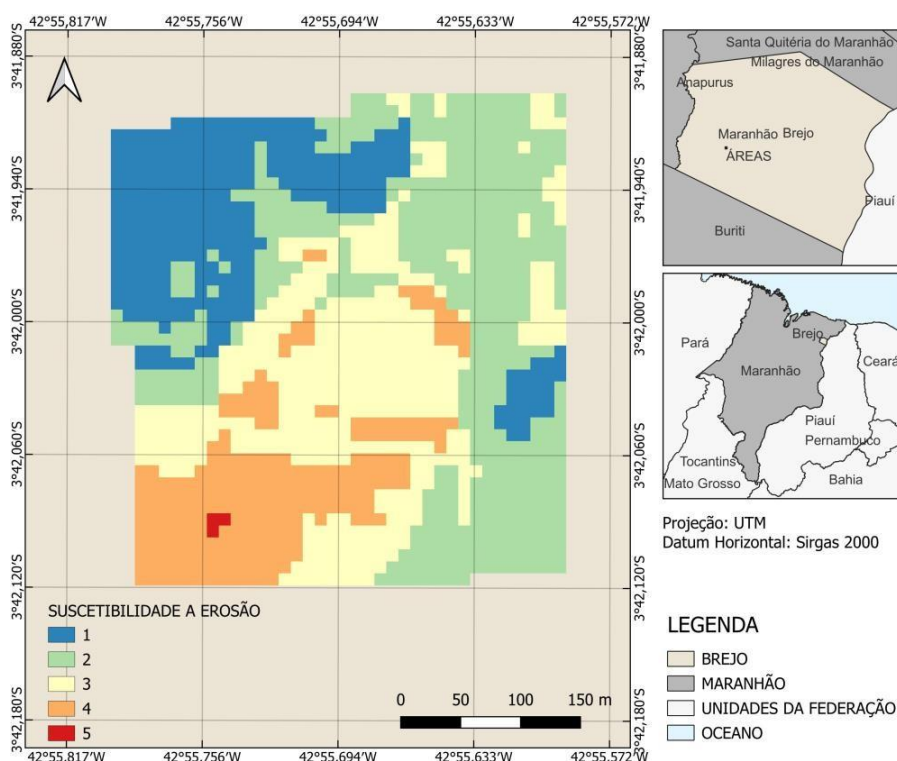
PESO	RISCO
1	Muito Baixo
2	Baixo
3	Médio
4	Alto
5	Muito Alto

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O mapa gerado a partir do modelo de suscetibilidade à erosão pode ser observado na figura 10. Nota-se que as áreas que apresentam risco muito alto a sofrer erosão são as com a presença de pastagem. Fiorese (2021) avaliando a suscetibilidade natural à erosão nas áreas de pastagem observou valores de potencial natural de erosão com intensidades compreendidas de média a forte à erosão atribuindo este fato a irregularidade do relevo do local

No presente trabalho, este fato deve-se ao maior peso atribuído ao parâmetro RMPS para determinação do modelo. A RMPS é um importante parâmetro para verificar o processo de compactação decorrente do aumento da densidade do solo devido ao rearranjo das partículas e redução da porosidade (LANGMAACK et al., 2002). A detecção de camadas compactadas e variações nas características físicas do solo em diferentes horizontes (REICHERT et al., 2010), desempenha um papel fundamental na avaliação da suscetibilidade do solo a processos erosivos, (ROSS; FIERZ, 2009), isso ocorre porque a presença de uma camada compactada abaixo da superfície impacta significativamente a capacidade de infiltração do solo, resultando em um aumento no volume de escoamento superficial.

Figura 10. Suscetibilidade à erosão para área agrícola com diferentes sistemas de cultivo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Pode ser notado que na área correspondente a mata nativa em sua grande parte apresentou a menor suscetibilidade à erosão (cor azul), devido a sua densa vegetação, mas, em algumas áreas ainda dentro da mata nativa é possível observar que a suscetibilidade varia de baixa (cor verde) a alta (cor laranja), sendo os pontos tendendo a maior suscetibilidade aqueles em que estavam mais próximos da zona de transição para a área de integração silvipastoril.

Na área de integração silvipastoril, nota-se que uma grande parte foi

classificada com suscetibilidade média (cor amarela) e alta, isso se deve ao tráfego de animais naquela zona.

Quanto a área apenas de pastagem, foi a que apresentou proporcionalmente a maior suscetibilidade à erosão, onde o fator declividade foi fundamental para atribuir um risco muito alto (cor vermelha), isso atrelado a resistência à penetração, no qual é o fator que foi atribuído o maior peso na equação do modelo, sem deixar de mencionar também os fatores como índice de vegetação e uso do solo.

Na figura 11, pode-se observar na área de pastagem que, como dito anteriormente apresentou um alta suscetibilidade à erosão, foi visualizada uma erosão laminar acontecendo. Isso se deve a alta compactação do solo impedindo a infiltração da água e favorecendo o escoamento superficial.

Figura 11. Erosão laminar aparente na área de pastagem.



Fonte: autoria própria (2023).

Com isso, se pode ter uma dimensão da importância da elaboração de um modelo de suscetibilidade à erosão de uma área agrícola, em que é possível presumir os pontos em que possam acotecer erosão, podendo assim, intervir com a utilização de um manejo conservacionista do solo. Manejo esse que o produtor de posse do mapa poderia realizar algumas operações para impedir ou mitigar o processo erosivo, como por exemplo, utilizar de uma subsolagem para infiltrar a água e diminuir o

escoamento superficial, construir terraços nas áreas de declividade mais acentuada, entre outros.

Detro da pesquisa ainda são encontradas algumas limitações desde a disponibilidade de dados até as questões metodológicas. Então, para futuros estudos seria interessante a adição de mais variáveis, afim de enriquecer ainda mais o trabalho.

6. CONCLUSÃO

A partir dos parâmetros declividade, resistência mecânica à penetração, índice de vegetação e usos e ocupação da terra foi possível a elaboração do modelo de suscetibilidade à erosão utilizando uma análise multicritérios.

As áreas ocupadas com pastagem e com a integração silvipastoril apresentaram maior suscetibilidade à erosão em decorrência da maior resistência mecânica à penetração.

As áreas com menor cobertura vegetal apresentaram maiores valores de suscetibilidade à erosão.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, J. R. C. B. et al. Desempenho da modelagem cinemática do escoamento superficial para chuvas intermitentes em solos com cobertura morta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 166–172, fev. 2015.

AGRA, R. M. R. T.; ANDRADE, C. D. Análise Multicritério da Suscetibilidade à Erosão na Bacia Hidrográfica do Rio da Batateira, CE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 1, p. 119–133, 19 fev. 2021.

ALMEIDA, W. S. DE et al. Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1110–1119, set. 2016.

ALVES, J. R. X., e ALVES, J. M. Definição de localidade para instalação industrial com o apoio do método de análise hierárquica (AHP). **Production**, v. 25, p. 13-26, 2014.

AMORIM, R. S. S. et al. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 124–130, abr. 2001.

AYER, J. E. B. et al. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, p. 180–191, jun. 2015.

BENEDITO, C. **O município e o meio ambiente: das áreas de preservação permanente**. Piracicaba, 2001. 29 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de Piracicaba, Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba.

PIMENTA, L. B. et al. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Interações** (Campo Grande), p. 407–420, 5 jul. 2019.

BORRELLI, P. et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n.

36, p. 21994–22001, 8 set. 2020.

CALDAS, V. I. S. P. et al. Suscetibilidade à erosão dos solos da bacia hidrográfica lagos–São João, no Estado do Rio de Janeiro–Brasil, a partir do método AHP e análise multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 04, p. 1415-1430, 2019.

CARDOSO, D. P. et al. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 6, p. 632–638, jun. 2012.

CARVALHO, D. C. F.; DORNAS, C.; BENVENUTO, G. Mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa no município de Belo Horizonte (MG) a partir da aplicação de análise multicritério. Em: **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. [s.l.] INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. p. 5626–5631.

COHEN, M.J. et al. Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed. **Geoderma**, v.124, p.235-252, 2005.

CORREA, E.A. et al. Resistência à penetração e densidade do solo como indicadores na análise da susceptibilidade a erosão hídrica dos solos. **Revista Geonorte**, Ed. Especial 4, Manaus, v.10, n.1, p. 141-146, 2014.

CUNHA, H. N. DA et al. Análise da suscetibilidade à erosão da bacia hidrográfica do alto camaquã (RS). **Caminhos de Geografia**, 23 jul. 2018.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em sistema de integração lavoura pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.7, p.1180-1186, 2012.

DECHEN, S. C. F. et al. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224–233, 20 abr. 2015.

DE SOUZA, M. M.; DE OLIVEIRA, A. L. R.; DE SOUZA, M. F. Location of agricultural warehouses based on spatial multicriteria analysis. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 1, 2023.

DOMAZETOVIĆ, F. et al. Development of automated multicriteria GIS analysis of gully

erosion susceptibility. **Applied Geography**, v. 112, p. 102083, nov. 2019.

DOTTO, A. V. E. et al. Aplicação do Processo Hierárquico Analítico (AHP) para o Mapeamento de Suscetibilidade ao Voçorocamento no município de Capão do Cipó – RS/Brasil. **Confins**, n. 60, 18 set. 2023.

DUARTE, M. L. et al. Avaliação da variabilidade espacial da resistência a penetração e teor de água de um solo de Terra Preta Arqueológica. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 200–208, 3 nov. 2022.

DYONISIO, H. A. F. Erosão hídrica: suscetibilidade do solo. **Revista Eletrônica Thesis**, v. 6, n. 13, p. 15-25, 2010.

EASTMAN, J.R. **Idrisi for Windows**. User's Guide. Version 2.0. Clark University, Worcester. 286 p. 1997.

FILHO, G. S. Modelo de classificação de processos erosivos lineares ao longo de ferrovias através de algoritmo de árvore de decisão e geotecnologias. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 1, p. 72-86, 2017.

FIORESE, C. H. U. et al. Susceptibilidade natural à erosão nas áreas de pastagem da sub-bacia hidrográfica do ribeirão Santa Cruz, no município de Muniz Freire (ES). **Journal on Innovation and Sustainability RISUS**, v. 12, n. 1, p. 83-96, 2021.

FLACH, C. W., ALVES, E. A. C., MEURER, M. Taxa de infiltração da água e resistência mecânica à penetração em solos submetidos a diferentes usos na região da serra de sudeste/RS. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 73, p. 223-242, 2020.

GDOURA, K.; ANANE, M.; JELLALI, S. Geospatial and multi-criteria analysis to rank suitable sites of shallow aquifer recharge with reclaimed water: application to Nabeul –Hammamet groundwater. **Resources, Conservations and Recyclin**, v. 104, p. 19-30,abr. 2014.

GIL, E.; KIJOWSKA-STRUGAŁA, M.; DEMCZUK, P. Soil erosion dynamics on a cultivated slope in the Western Polish Carpathians based on over 30 years of plot studies. **CATENA**, v. 207, p. 105-682, dez. 2021.

GOMES, D. J. C. et al. Suscetibilidade à erosão hídrica do solo: bacia hidrográfica do rio Capim (MA-PA). **Ciência e Natura**, v. 43, p. e55, 8 mar. 2021.

GUERRA, A. J. T. et al. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuario do Instituto de Geociencias**, v. 37, n. 1, p. 81–91, 2014.

HOAD, S.P. et al. Quantificação de pressão crítica para o crescimento de plantas. In: LIER, Q.de J.van. **Física do Solo**. Viçosa: SBCS, 2010.

IZIDORO DA SILVA, L. et al. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob diferentes manejos e métodos. **Revista do departamento de geografia**, v. 40, p. 40-48, 2020.

J. C., & UMMUS, M. E. Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). **Revista Ambiente & Água**, v. 8, p. 204-214, 2013.

JESUZ, C. R. DE; CABRAL, I. D. L. L. Análise da erosão laminar em áreas com uso agrícola e pastagem: bacia hidrográfica do rio Tenente Amaral – MT. **Geosul**, v. 34, n. 72, p. 254–279, 25 jul. 2019.

KUNZ, M. et al. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1699–1708, dez. 2013.

LACERDA, H. C. et al. Estudo da Susceptibilidade à Erosão Laminar em Bacia Hidrográfica da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.3 p. 1707-1723, 2021.

LANGMAACK, M. et al. Soil structure rehabilitation of arable soil degraded by compaction. **Geoderma**, v. 105, n. 1–2, p. 141–152, jan. 2002.

LIMA, C. A. DE et al. Agricultural practices in the cultivation of cassava and the relation to runoff, and soil and water loss. **Revista ciência agronômica**, v. 46, n. 4, p. 697–706, 2015.

LIMA, G. C. et al. MARANHÃO - GOVERNO DO ESTADO DO MARANHÃO. Gerência de Planejamento e Desenvolvimento Econômico - GEPLAN. **Atlas do Maranhão**. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão, 39 p. 2002.

LISTO, F. D. L. R.; XAVIER, J. P. DE S. CARTA DE SUSCETIBILIDADE A EROÇÃO DO MUNICÍPIO DE ALIANÇA – PE A PARTIR DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO. **CLIO – Arqueológica**, v. 32, n. 3, p. 180, 5 set. 2017

MATOS DE CARVALHO, H. J. et al. Estimativa de perda de solo por erosão laminar em Lucena-PB. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 5, p. 57–68, 6 jun. 2019.

MENDES, B. V. Biodiversidade e desenvolvimento sustentável do Semiárido. Fortaleza: SEMACE, 1997. 108p.

MIOTO, L. S. et al. Resistência mecânica do solo à penetração avaliada em área de segundo ano de implantação da cultura da mandioca (*Manihot esculenta* CRANTZ). **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 4601–4620, 2020.

NICOLETE, D. A. P.; ZIMBACK, C. R. L. Zoneamento de risco de incêndios florestais para a fazenda experimental Edgardia–Botucatu (SP), através de sistemas de informações geográficas. **Revista Agrogeoambiental**, v. 5, n. 3, 2013.

OLIVEIRA, F. V.; JESUS, A. S. **Suscetibilidade erosiva na bacia do Córrego Lava-Pés em Silvânia–GO**. Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento, v. 1, p. 1010-1015, 2017.

OLIVEIRA, L. N.; AQUINO, C. M. S. Índice da Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) na Sub-Bacia Hidrográfica do rio Gurguéia, Piauí - Brasil: análise do efeito da expansão agrícola. **Revista Geoaraguaia**, v. 10, n. 2, p. 126-143, 2020.

OLIVEIRA, V. H. D. et al. **Unidades de Gestão Diferenciada por meio de índices de vegetação e mapas de produtividade**. 2021. 69. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2021.

PINESE JÚNIOR, J. F.; CRUZ, L. M.; RODRIGUES, S. C. Monitoramento de erosão laminar em diferentes usos da terra, Uberlândia - MG. **Sociedade & Natureza**, v. 20, n. 2, p. 157–175, dez. 2008.

PINHEIRO, A. G. et al. Eficiência da cobertura vegetal na redução das perdas de água e solo no município de iguatu. **Irriga**, v. 23, n. 1, p. 133–142, 30 mar. 2018.

PINTO, G. S. et al. **Estimativa das perdas de solo por erosão hídrica utilizando o**

Método de Erosão Potencial. Geography Department University of Sao Paulo, v. 39, p. 62–71, 23 jun. 2020.

RAHMAN, M.R.; SHI, Z.H.; CHONGFA, C. Soil erosion hazard evaluation an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. **Ecological Modelling**, v. 220, p. 1724-1734, 2009.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. 1995. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS. 65p

RAMOS, J. C. et al. Influência das condições de superfície e do cultivo do solo na erosão hídrica em um cambissolo húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1587–1600, out. 2014.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S; HORN, R. **Mecânica do Solo**. In: LIER, Q.de J.van. Física do Solo. Viçosa: SBCS, 2010.

REZENDE, P. S.; MARQUES, D. V.; OLIVEIRA, L. A. Construção de modelo e utilização do método de Processo Analítico Hierárquico–AHP para mapeamento de risco à inundação em área urbana. **Revista Caminhos da Geografia**, v. 18, n. 61, p. 1-18, mar. 2017.

ROSS, J.L.S.; FIERZ, M. de S.M. **Algumas técnicas de pesquisa em geomorfologia**. In: VENTURI, L.A.B. (org). Praticando geografia: Técnicas de Campo e Laboratório. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

RUTHES, J. M.; TOMAZONI, J. C.; GOMES, T. C. Influência do Uso e Ocupação do Solo no Processo Erosivo Laminar do Município de Francisco Beltrão – Sudoeste do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 2, 15 ago. 2016.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. **Springer Science & Business Media**, 2001.

SAHA, S. et al. Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 23, p. 649, 11 dez. 2019.

SANTOS, J. P. C.; CALDAS, V. I. S. P.; SILVA, A. S. Suscetibilidade a Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica Lagos – São João, no Estado do Rio de Janeiro – Brasil, a partir do Método AHP e Análise Multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 4, p. 1415–1430, 11 nov. 2019.

SANTOS, L. A. N.; NASCIMENTO, P. S. DE R.; BARROS, G. V. P. DE. Processamento analítico hierárquico no mapeamento da fragilidade ambiental à erosão do solo. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 8, n. 4, p. 275, 28 out. 2020.

SANTOS, M. S.; NASCIMENTO, P. S. D. R. Análise da suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão hídrica pelo processo analítico hierárquico (AHP). **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 9, n. 1, p. 1, 26 abr. 2021.

SANTOS, R. C.; GUERRA, A. J. T. Avaliação da erosão dos solos na bacia hidrográfica do rio pequeno, Paraty-RJ. **Geosaberes**, v. 12, p. 23, 13 jan. 2021.

SILVA, R. L. E; DE MARIA, I. C. Erosão em sistema plantio direto: influência do comprimento de rampa e da direção de semeadura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 554–561, jun. 2011.

SOARES, W. O.; TORRES, F. T. P.; DA COSTA, L. M. Estudo da Susceptibilidade à Erosão Laminar em Bacia Hidrográfica da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 03, p. 1707-1723, 2021.

PEDROSA, A. S.; ROCHA, E. A. V. Proposta de modelagem da suscetibilidade a erosão laminar. Um estudo de caso na Bacia do Ribeirão Vai-Vem (GO), Brasil. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 5, p. 1707–1720-1707–1720, 2012.

SOUSA, F. R. C. ; PAULA, D. P. Análise de perda do solo por erosão na bacia hidrográfica do rio coreaú (Ceará-Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, p. 491–507, 1 jul. 2019.

SOUSA, M. M. M. et al. Influência do manejo da vegetação em microbacias hidrográficas e suas respostas hidrosedimentológicas. **Revista Equador**, v. 5, n. 4, p. 43–55, 26 ago. 2016.

SOUZA, N. D. C. et al. An evaluation of erosion in cuesta relief: São Paulo State, Brazil. **Geomorphology**, v. 398, p. 108049, 1 fev. 2022.

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro - 1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-12, 2002.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 755–760, jun. 2004.

TORRES, H. **Levantamento da perda de solo atual por erosão hídrica do município de cachoeiro de Itapemirim (ES)**. Cadernos Camilliani e-ISSN: 2594-9640, v. 16, n. 3, p. 1525-1546, 2021.

VASCONCELLOS, R. C. DE; BELTRÃO, N. E. S. Avaliação de prestação de serviços ecossistêmicos em sistemas agroflorestais através de indicadores ambientais. **Interações** (Campo Grande), p. 209–220, 16 fev. 2018.

WENDLING, I. J. et al. Sistemas silvipastoris – uma alternativa viável para áreas montanhosas do Espírito Santo. Em: Sistemas Integrados de Produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias. [s.l.] **Editora Científica Digital**, p. 184–216, 2021.

WIND, Y.; SAATY, T. L. Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process. **Management Science**, v. 26, n. 7, p. 641–658, jul. 1980.

WU, S. et al. **Variable scale effects on hillslope soil erosion during rainfall-runoff processes**. CATENA, v. 207, p. 105606, dez. 2021.

ZHANG, J. et al. The effects of tillage on sheet erosion on sloping fields in the wind-water erosion crisscross region of the Chinese Loess Plateau. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 235–245, abr. 2019.