

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**MAPEAMENTO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL UTILIZANDO
SENSORIAMENTO REMOTO E PROCESSO HIERÁRQUICO
ANALÍTICO**

LEONARDO GONSALVES BERGO

**VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
DEZEMBRO – 2023**

LEONARDO GONSALVES BERGO

**MAPEAMENTO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL UTILIZANDO
SENSORIAMENTO REMOTO E PROCESSO HIERÁRQUICO
ANALÍTICO**

Monografia apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do curso de Engenharia Florestal para a obtenção do título de Engenheiro Florestal.

ORIENTADOR: Prof. Dr. CRISTIANO TAGLIAFERRE (UESB)

**VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
DEZEMBRO – 2023**

LEONARDO GONSALVES BERGO

**MAPEAMENTO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL UTILIZANDO
SENSORIAMENTO REMOTO E PROCESSO HIERÁRQUICO
ANALÍTICO COMO SUPORTE À DECISÃO**

Monografia apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do curso de Engenharia Florestal para a obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovada em 06 de dezembro de 2023.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Cristiando Tagliaferre – UESB

Prof. Dr. Alessandro de Paula – UESB

Prof^a. Dra. Edilene Pereira Ferreira - UESB

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, que sempre me incentivou a trilhar meu próprio caminho. Sei que observa e comemora comigo cada conquista. Sua luz continua a me guiar.

Ao meu tio Ubaldo, por me ajudar a enxergar tudo que eu poderia ser. Você foi e continua sendo meu ponto de referência.

Dedico também a meus avós, que puderam compartilhar um pouco do seu grande amor e sabedoria comigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todos que estiveram comigo nessa jornada que parecia ser infindável.

Agradeço minha mãe pelo zelo e pelos ensinamentos, você é meu exemplo como pessoa e como profissional. Seu apoio incondicional é a base de tudo que eu conquistei e irei conquistar.

Agradeço a Lara e tia Cica, por todo o amor e por terem fé de que eu posso ser muito mais do que eu era ontem.

Agradeço aos meus irmãos outras mães, pelo companheirismo e pelo encorajamento para seguir com minha jornada.

Sofia, obrigada por sempre estar comigo. Se hoje eu estou concluindo esta etapa, é também graças a você.

Agradeço aos amigos da república, Kaique, Vitor e Theilon. Vocês foram parte essencial da minha trajetória. Morar com vocês não foi a tarefa mais fácil, mas sinto saudade todos os dias.

Agradeço a Cristiano, meu orientador, por ter assumido e ter me ajudado nesta última missão na faculdade. Agradeço também a todos os professores e mestres com quem pude aprender e me espelhar.

RESUMO

BERGO, Leonardo Gonsalves, Engenheiro Florestal, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, dezembro de 2023. **Mapeamento de fragilidade ambiental utilizando sensoriamento remoto e processo hierárquico analítico.** Orientador: Cristiano Tagliaferre.

O conceito de fragilidade ambiental tange da susceptibilidade de um sistema ecodinâmico a sofrer perturbações, ou fugir de seu estado de equilíbrio. Quando o equilíbrio do sistema é quebrado, por vias naturais ou artificiais, o mesmo está vulnerável a entrar em colapso, acarretando em diversos riscos a biodiversidade, solo, recursos hídricos e também podendo trazer perigo e adversidade à ocupação humana. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto para o estudo dos fenômenos naturais já é bem difundida, angariando cada vez mais diversificação e sofisticação com o passar do tempo. O processo hierárquico analítico é vastamente utilizado como suporte à decisão quanto à análise de diferentes critérios de um sistema de fragilidade ou vulnerabilidade ambiental. Ao atribuir pesos relativos a cada critério, o processo hierárquico analítico facilita a tomada de decisões ao proporcionar uma estrutura matemática para a avaliação comparativa. O objetivo deste trabalho foi, por meio do mapeamento utilizando técnicas de sensoriamento remoto, caracterizar a fragilidade ambiental para o município de Porto Seguro/BA, utilizando o processo hierárquico analítico como suporte à decisão para atribuir os pesos de importância de cada critério em análise. As informações cartográficas da extensão territorial de Porto Seguro foram obtidas por meio de repositórios de metadados públicos, e transformadas em mapas temáticos. Foi obtido o Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado (MFP) e o Mapa de Fragilidade Ambiental pela Média Aritmética (MFMA). Os mapas foram avaliados quanto à sua capacidade de trazer fragilidade à um ambiente, e classificados de acordo a sua intensidade. O município de Porto Seguro apresentou a predominância da intensidade média de fragilidade para seu território nos dois mapas, com 66,33% para o MFP e 74,16% para o MFMA. As metodologias empregadas para a obtenção dos critérios de fragilidade ambiental se mostraram eficientes. O método de atribuição de pesos pelo processo hierárquico analítico se mostrou adequado, relacionado e comparando os diferentes fatores causadores da fragilidade ambiental.

Palavras-chave: Processo erosivo, vulnerabilidade, perda de solo, geotecnologias, planejamento territorial, análise multicritério.

ABSTRACT

BERGO, Leonardo Gonsalves, Forestry Engineer, State University of Southwest Bahia, December, 2023. **Environmental fragility mapping using remote sensing and analytic hierarchy process.** Advisor: Cristiano Tagliaferre.

The concept of environmental fragility pertains to the susceptibility of an ecodynamic system to disturbances or deviations from its state of equilibrium. When the system's balance is disrupted, whether through natural or artificial means, it becomes vulnerable to collapse, posing various risks to biodiversity, soil, water resources, and potentially endangering human settlements. The use of remote sensing techniques for studying natural phenomena is well-established, increasingly diversifying and sophisticating over time. The Analytic Hierarchy Process is widely employed as decision support for analyzing different criteria in a system of environmental fragility or vulnerability. By assigning relative weights to each criterion, the Analytic Hierarchy Process facilitates decision-making by providing a mathematical framework for comparative evaluation. The aim of this study was to characterize environmental fragility for the municipality of Porto Seguro/BA through mapping using remote sensing techniques, utilizing the Analytic Hierarchy Process to assign weights to each analyzed criterion. Cartographical information about Porto Seguro's territorial extent was obtained from public metadata repositories and transformed into thematic maps. A Weighted Environmental Fragility Map (MFP) was obtained along with an Environmental Fragility Map by Arithmetic Mean (MFMA). The maps were assessed for their ability to depict fragility in an environment and classified according to intensity. The municipality of Porto Seguro predominantly exhibited a medium intensity of fragility across its territory in both maps, with 66,33% for MFP and 74,16% for MFMA. The methodologies employed for obtaining environmental fragility criteria proved effective, and the Analytic Hierarchy Process for assigning weights demonstrated appropriateness in relating and comparing different factors contributing to environmental fragility.

Keywords: Erosion process, vulnerability, soil loss, geotechnologies, territorial planning, multicriteria analysis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1. Processo erosivo, ecodinâmica e fragilidade ambiental	11
2.2. Critérios integrantes à fragilidade ambiental.....	12
2.3. Sensoriamento remoto e processo hierárquico analítico (AHP)	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1. Área de estudo	17
3.2. Compilação e processamento de dados.....	18
3.3. Mapas de declividade e dissecação do relevo.....	19
3.4. Mapa de erosividade das chuvas	23
3.5. Mapas de uso e ocupação do solo e pedologia	24
3.6. Definição dos pesos de importância através do processo hierárquico analítico	25
3.7. Mapa de Fragilidade Ambiental	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5. CONCLUSÃO	48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa científica desempenha um papel crucial na identificação e avaliação dos impactos ambientais, na formulação de estratégias para mitigação de danos e na promoção de políticas públicas que visam à proteção dos ecossistemas para as gerações presentes e futuras. A compreensão profunda da resposta do meio ambiente aos efeitos das atividades humanas é essencial para a implementação de medidas que visam a conservação do mesmo, onde nem toda intervenção antrópica será sinônimo de degradação ambiental.

A Fragilidade Ambiental é uma ferramenta de análise sistemática fundamentada nos princípios da ecodinâmica, introduzidos por Tricart (1977). Essa abordagem considera as interações entre os elementos do ambiente físico e biológico, possibilitando a avaliação dos potenciais impactos gerados por atividades humanas em uma região específica, além de estudar a vulnerabilidade natural de determinados tipos de sistemas ecológicos.

O entendimento das capacidades dos recursos naturais envolve a análise e avaliação dos solos, topografia, composição geológica e pedológica, recursos hídricos, condições climáticas, diversidade vegetal e faunística, ou seja, de todos os elementos do ambiente geográfico que sustentam a vida (ROSS, 1994). São esses elementos que estabelecem os fatores avaliados no desenvolvimento de mapas de fragilidade ambiental, onde ao serem tratados como parte de um todo, permitem o diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas da fragilidade dos ambientes naturais (SPÖRL, 2007).

O sensoriamento remoto se mostrou uma ferramenta altamente eficaz para realizar análises precisas em maiores escalas, constituindo, atualmente, numa das principais fontes geradoras de informações geográficas disponíveis. A facilidade de obtenção dessas informações por meio de satélites, drones e outras tecnologias tem revolucionado a forma de compreender e gerenciar o meio ambiente. Além disso, a capacidade de capturar dados de forma contínua e regular ao longo do tempo possibilita a análise de tendências e a realização de operações complexas, integrando um volume abundante de dados de natureza e escalas distintas (VALLE; FRANCELINO; PINHEIRO, 2016).

A avaliação multicritério funde os dados espaciais obtidos pelas ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) em mapas temáticos finais, destinados

à ilustração e análise dos problemas levantados. Através do método de processo hierárquico analítico (*analytic hierarchy process* – AHP) proposto por Saaty (1980), é possível atribuir pesos distintos para os fatores de comparação, de acordo com sua importância dentro do processo.

O mapeamento de fragilidade ambiental é uma ferramenta que contribui para um melhor ordenamento da ocupação urbana e rural, identificando áreas mais ou menos susceptíveis aos processos erosivos. Essa abordagem pode ser utilizada para embasar estratégias de ocupação territorial, contribuindo para a promoção de práticas sustentáveis e a mitigação dos impactos provenientes das atividades antrópicas. Ao identificar áreas vulneráveis, são fornecidas informações valiosas para o estudo de medidas eficazes de conservação do solo, controle da erosão e adequação do uso da terra.

O município de Porto Seguro destaca-se como uma localidade de importância significativa, não apenas por sua relevância histórica e cultural, mas também por abrigar importantes áreas de conservação ambiental, representadas pelos Parques Nacionais que o integram. Rios de significativa importância para a região atravessam o município de Porto Seguro, enriquecendo sua geografia e desempenhando um papel vital em sua dinâmica ambiental, favorecendo a iniciativa do estudo sobre a fragilidade ambiental nessa localidade. Esses cursos d'água não apenas moldam a paisagem e influenciam a biodiversidade, mas também representam elementos-chave para compreender a ocupação territorial, os processos erosivos, e outros fenômenos ambientais na região. O município experimentou um notável crescimento econômico ao longo das últimas décadas, impulsionado pelo turismo, que desempenha um papel fundamental na economia local, atraindo visitantes devido às suas praias, sua rica herança histórica e seus eventos culturais, que contribuem significativamente para a expansão econômica do município.

O objetivo deste estudo foi caracterizar a fragilidade ambiental para o município de Porto Seguro/BA, identificando o grau de intensidade predominante. Avaliou-se também a eficiência das metodologias que visam a obtenção dos critérios de fragilidade e a definição dos seus respectivos pesos de importância, através dos testes de consistência. Para isso, foi gerado o Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado, empregando o processo hierárquico analítico para a atribuição dos pesos relativos a cada critério, e o Mapa de Fragilidade Ambiental pela Média Aritmética, que proporcionou um elemento comparativo entre as abordagens.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Processo erosivo, ecodinâmica e fragilidade ambiental

A perda de solo e o processo erosivo são adversidades ambientais altamente recorrentes e abrangentes, pelo seu potencial de ocorrer em diferentes regiões com diferentes características ambientais, além de também serem problemas relacionados à ocupação e atividade humana (MORAIS; SALES, 2017). Naturalmente, diversos fatores ambientais por si só são agentes ativos e passivos no processo de perda de solo, onde a atividade humana desregulada pode agravar a condição natural estabelecida, acelerando o processo erosivo (SANTOS; GUERRA, 2021).

De acordo com Durães e Mello (2016), a aceleração constante dos processos erosivos já é amplamente reconhecida como um problema tangente à ocupação territorial para as diversas práticas de uso e ocupação do solo, interferindo diretamente na produtividade destes sistemas. O processo erosivo ocasiona a redução na porosidade do solo, a dificuldade de infiltração, absorção e retenção de água para as camadas mais profundas, retroalimentado pelo aumento da quantidade de solo carregada pelo escoamento superficial.

Desta forma, é necessário que toda a intervenção humana nos ambientes naturais seja planejada de acordo com as potencialidades dos recursos físico-ambientais, tomando como premissa a fragilidade natural daquele ambiente (ROSS, 1994). Se faz imperativo que o desenvolvimento tecnológico, econômico e social esteja atrelado à conservação e recuperação ambiental do sistema em que está sendo aplicado.

Tricart (1977), introduz o conceito de unidades ecodinâmicas, buscando compreender as interações entre os elementos ambientais, considerando as transformações ecológicas em uma interface espaço-temporal. A concepção de unidades ecodinâmicas parte do reconhecimento da fluidez dos ecossistemas, onde as trocas de energia na natureza sempre irão buscar um equilíbrio dinâmico, considerando fatores como as influências antrópicas, eventos naturais e processos cíclicos como agentes que moldam a estrutura e a função dos ecossistemas. O referido autor reconhece as formações vegetais como protagonistas contra os diferentes tipos de processos erosivos e de perda de solo, por conta da ação amortecedora contra o impacto da pluviosidade e do potencial que a força do vento

possui em carregar ou deslocar as partículas do solo (FREIRES et al., 2022). O estudo aprofundado sobre os elementos que compõem a paisagem permite entender as formas em que cada elemento se relaciona com o outro, possibilitando também avaliar os impactos das atividades antrópicas nesta complexa relação (MATOS, 2016).

Ross (1994) e Crepani et al. (2001) são expoentes que trouxeram uma visão empírica para o estudo das unidades ecodinâmicas e sua relação entre os diferentes elementos formadores das paisagens, incorporando a cartografia como uma plataforma para avaliação de diferentes critérios físico-ambientais. Ao considerar que determinada seção de um terreno possui uma combinação de elementos e interações que podem ser registradas e quantificadas, o mapeamento se torna uma “âncora” que possibilita a interpretação e análise desses dados (CREPANI et al., 2001).

O conceito de fragilidade ambiental tange da susceptibilidade de um sistema ecodinâmico a sofrer perturbações, ou fugir de seu estado de equilíbrio (SPÖRL, 2007). Quando o equilíbrio do sistema é quebrado, por vias naturais ou artificiais, o mesmo está vulnerável a entrar em colapso, acarretando em diversos riscos a biodiversidade, solo, recursos hídricos e também podendo trazer perigo e adversidade à ocupação humana.

Fundamentado nestes conceitos, Ross (1994) expôs que para obter panorama geral da fragilidade de um sistema ambiental, é necessário estudar a relação entre os critérios físico-ambientais que são componentes deste meio, como o relevo, o clima e as formas de ocupação da terra, por exemplo. Esta separação e análise individual permite a hierarquização dos graus da fragilidade do ambiente natural, tendo como produto final a carta ou mapa de fragilidade ambiental. O referido mapa é utilizado como um intermediário para a proposições da ocupação ordenada e sustentável do território e o uso de seus recursos disponíveis (BECKER; EGLER, 1997).

2.2. Critérios integrantes à fragilidade ambiental

Para avaliar a fragilidade ambiental como um todo, primeiramente é necessário entender e estudar a relação dos critérios que a compõe. Ross (1994) trouxe que a análise metodológica da fragilidade ambiental exige estudos sobre as formações do relevo, do solo, do uso e ocupação da terra e da chuva, que são utilizados para a confecção de produtos cartográficos temáticos. O autor ampliou o conceito de unidades ecodinâmicas ao tratar do potencial de fragilidade ou instabilidade dos

meios, hierarquizando-os em cinco graus diferentes, variando do “muito fraco” a “muito forte”.

De acordo com Cunha, Mendes e Sanches (2003), entende-se como geomorfologia o estudo das formas de relevo e seus processos formadores, onde a cartografia geomorfológica se estabelece como um dos principais meios de análise do objeto de pesquisa. Santos e Ross (2012) afirmaram que a carta geomorfológica é um dos protagonistas para a estruturação do mapa de fragilidade ambiental, onde a própria definição da fragilidade relacionada ao relevo segue como base “a definição dos padrões de formas com a rugosidade topográfica ou a matriz dos índices de dissecação do relevo” (SANTOS; ROSS, 2012, p. 134). Os referidos autores também expuseram que a declividade, contanto que seja classificada em intervalos conhecidos, pode ser utilizada em pesquisas que exijam um maior grau de detalhamento.

Gouveia et al. (2022), descreveram que a declividade possui grande relevância ao estudar as causas da fragilidade ambiental, onde o referido critério se relaciona intrinsecamente com o escoamento superficial ao aumentar o potencial de enxurrada da chuva. Crepani et al. (2001) ressaltaram que um maior grau de declividade diminui o tempo que a água precipitada atinge os cursos d'água, e que quanto maior a declividade, mais rapidamente a energia potencial das águas da chuva se transforma em energia cinética, aumentando o volume de água em deslocamento e sua capacidade de transporte de sedimentos.

Ross (1994) propôs que o Índice de Dissecação do Relevo também seja utilizado para escalas variadas. O autor explicou que a este índice é baseado na associação entre o grau de entalhamento dos vales (descrito como o aprofundamento dos canais de drenagem), e a dimensão interfluvial média (distância média entre os divisores de água de uma determinada área).

O Índice de Dissecação do Relevo pode ser utilizado para entender a relação entre o processo de formação e modelagem do relevo e o processo intempérico formador dos solos (GUIMARÃES et al., 2017), além de ser considerado um parâmetro importante na avaliação da vulnerabilidade ambiental de um sistema (ROSS, 1994; CREPANI et al., 2001; GUIMARÃES et al., 2017; MARCOS; RUBIRA; PISANI, 2021).

De acordo com Crepani et al. (2001), o clima também é um critério a ser avaliado no processo de intemperismo, por conta do controle exercido na temperatura

e precipitação pluviométrica de determinado local. O índice de erosividade das chuvas mede a capacidade da precipitação em causar perda de solos e desencadear processos erosivos em determinada localidade (BOLLELI et al., 2023).

Diferentes elementos como a intensidade pluviométrica, duração, frequência e volume de chuvas estão diretamente atrelados à sua capacidade erosiva. Freitas (2019) destacou a possibilidade de comparação qualitativa entre diferentes chuvas, por conta da capacidade erosiva potencial que a precipitação exerce no solo, sendo possível a quantificação deste índice.

Fatores físicos como a cobertura, classe do solo ou a declividade se relacionam diretamente na energia cinética empreendida pelo impacto e escoamento das chuvas, se tornando agentes passivos, podendo incrementar ainda mais a vulnerabilidade do ambiente à perda de solos. Em contrapartida, o impacto direto e o escoamento superficial da precipitação são os agentes ativos (CREPANI et al., 2001).

Ao tratar dos tipos de cobertura da terra, Spörl (2007) expuseram que o mapa de uso e ocupação do solo é um produto intermediário importante utilizado para caracterizar o grau de proteção dos solos exercido pelos diferentes tipos de vegetação ou atividades antrópicas. As práticas de conservação e manejo sustentável dos recursos naturais são fatores que podem conter o avanço e aceleração dos processos erosivos dos solos, ao protege-lo da energia de impacto e movimentação da água desprendida pelas chuvas, enquanto atividades desnudadoras da superfície ou à exposição direta do solo às intempéries naturais podem agravar a qualidade e resistência daquele ambiente (ROSS, 1994).

Candido (2008) abordou que a remoção da cobertura vegetal acarreta em mudanças locais e sistemáticas, trazendo alterações para o microclima local e superficial, diminuindo o índice pluviométrico da região ao aumentar a temperatura do solo. O referido autor também descreveu que o solo exposto desencadeia processos erosivos por conta da perda de solo proveniente do impacto da chuva, além do maior potencial de carreamento das partículas do solo e decomposição da matéria orgânica, diminuindo mais ainda a capacidade deste solo em reter água.

O solo, como agente passivo na cadeia de fragilidade ambiental, também pode contribuir com o processo erosivo por conta das suas diferentes formações e características genéticas (BERTONI; LOMBARDI, 2012). Os autores Lima, Oliveira e Moura-Fé (2021) expuseram que o processo intempérico do solo é cíclico, equilibrado e natural, entretanto, a ação antrópica que não é complacente com suas

características naturais pode acarretar em uma degradação que não é de fácil recuperação, ou até mesmo podendo ser permanente.

Oliveira (2019) descreveu que as principais causas que desencadeiam a fragilidade de um solo aos processos erosivos estão relacionadas com sua permeabilidade, profundidade, sua estrutura e a ocorrência de camadas de impedimento. Solos mais jovens e menos desenvolvidos estão mais vulneráveis ao processo erosivo, enquanto solos mais profundos, homogêneos e formados por longos ciclos de intemperismo são menos frágeis.

2.3. Sensoriamento remoto e processo hierárquico analítico (AHP)

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto para o estudo dos fenômenos naturais já é bem difundida, angariando cada vez mais diversificação e sofisticação com o passar do tempo (GAIDA et al., 2020). O sensoriamento remoto é um instrumento aplicado no estudo da superfície terrestre, graças à alta gama de satélites disponíveis para os mais diversificados fins, com uma cobertura e representatividade global e a possibilidade de análise espaço-temporal.

De acordo com Nascimento et al. (2016), através dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG's), é possível armazenar, manipular e analisar as informações naturais das paisagens, se tornando importantes ferramentas de estudo de fenômenos e interações ambientais. Os referidos autores ainda destacaram o sucesso que as ferramentas de sensoriamento remoto performam no monitoramento ambiental e urbano, onde é possível produzir mapas temáticos para os diferentes fatores em avaliação.

Matos (2016) expôs que os SIG's são vastamente utilizados para a manifestar fenômenos físico-ambientais em um sistema virtual, possibilitando que sejam aplicados para o planejamento urbano e ocupacional do solo, a conservação dos recursos naturais, e para uma análise geopolítica como um todo. Os autores Milanezi e Pereira (2016) descreveram que os SIG's são ferramentas de alto valor para um planejamento territorial que se torna cada vez mais complexo, visto que podem ser utilizados para documentação, visualização e análises dos fenômenos naturais.

O processo hierárquico analítico (AHP), proposto por Saaty (1980) é vastamente utilizado como suporte à decisão quanto à análise de diferentes critérios de um sistema de fragilidade ou vulnerabilidade ambiental (FERNANDES et al., 2019;

LIRA; FRANCISCO; FEINDEN, 2022; WEISS; PIPPI, 2019). Ao atribuir pesos relativos a cada critério, o processo hierárquico analítico facilita a tomada de decisões ao proporcionar uma estrutura matemática para a avaliação comparativa, tornando-se particularmente eficaz em contextos nos quais a hierarquia das relações entre os critérios é fundamental para a análise da composição do produto final.

Para efetivamente fazer uso do processo hierárquico analítico, são consultados especialistas nas diversas áreas do conhecimento que abrangem a temática a ser desenvolvida. A opinião técnico-científica dos mesmos fornece *insights* valiosos na definição do relacionamento entre os critérios, contribuindo para uma representação mais fiel da realidade do sistema em análise (SPÖRL, 2007). Além disso, essa abordagem direcionada assegura que a análise seja abrangente, levando em consideração as diferentes perspectivas e conhecimentos específicos de cada campo.

A aplicação do método se dá através da relação algébrica entre os produtos cartográficos obtidos a partir do estudo dos critérios de avaliação. A pesquisa de opinião realizada com os especialistas possui a premissa de estabelecer o confronto pareado entre os critérios de fragilidade ambiental, em que a expertise técnico-científica dos consultados permite o julgamento subjetivo e a hierarquização do grau de importância de cada critério (MATOS, 2016).

Como forma de verificar a solidez das respostas dos especialistas, Saaty (1980) propôs uma métrica de validação chamada de Razão de Consistência (RC), considerando a consulta satisfatória quando esse valor é inferior a 0,1, ou 10%. A RC permite a determinação das alternativas que possuem menor contradição interna, auxiliando o pesquisador na tomada de decisão. Mesmo quando duas variáveis dentro do processo não podem ser normalmente comparadas, o processo hierárquico analítico utiliza a experiência técnico-científica dos especialistas para realizar os julgamentos necessários (SAATY, 1991).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo contempla a extensão territorial do município de Porto Seguro, localizado no extremo sul da Bahia, em que o centro da zona urbana está inserido na Latitude 16°25'2.34"S e Longitude 39°6'37.53"O, obedecendo o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) SIRGAS 2000, Zona 24K, à uma altitude de 4m.

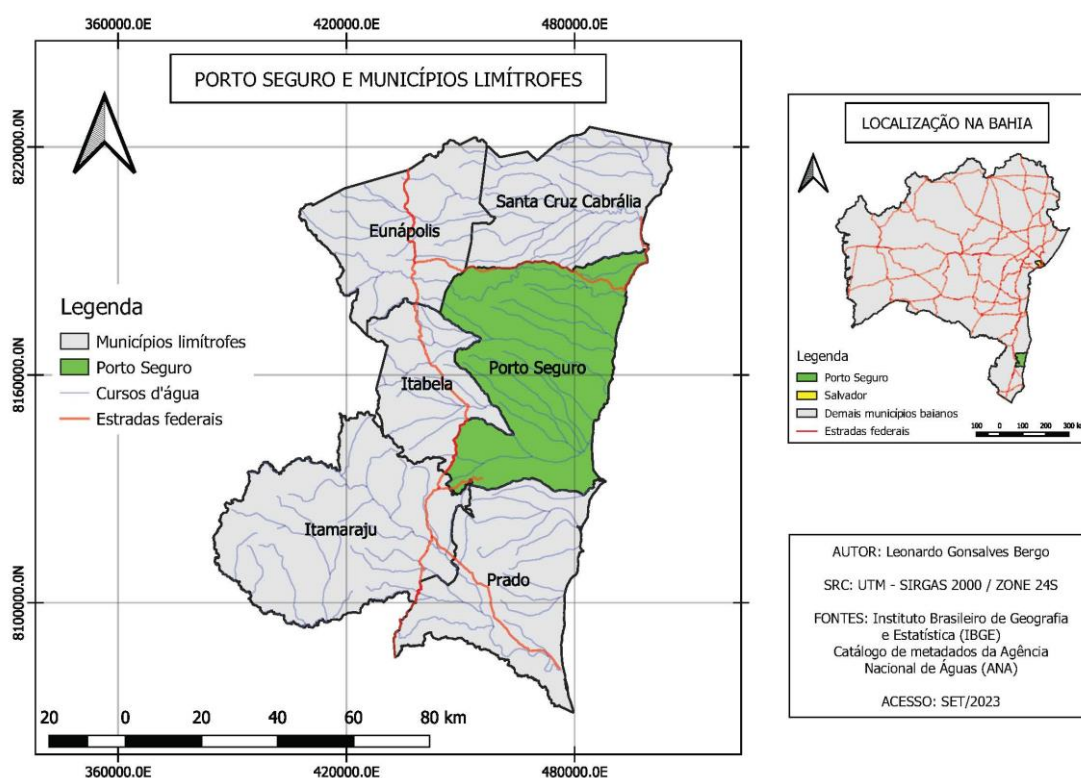


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

Porto Seguro faz limite, à oeste, com os municípios de Eunápolis e Itabela, ao norte com Santa Cruz Cabrália, e ao sul com os municípios de Prado e Itamaraju. De acordo com o IBGE (2022), sua área total perfaz 2.285,734 km², registrando uma população total de 168.326 habitantes, assim resultando em uma densidade populacional de 73,64 hab/km². Apenas 1,91% da extensão territorial do município é urbanizada, cerca de 18% da população reside na sua zona rural (IBGE, 2010).

De acordo com o IBGE (2022), a economia de Porto Seguro vem primariamente do setor de serviços, que representa 62% do Produto Interno Bruto (PIB) local, sendo o turismo sua representação majoritária. A agropecuária e a indústria, juntos, somam

12% do PIB do município, em que a pecuária bovina e a cafeicultura são os principais expoentes deste setor.

O município, de acordo com a classificação de Thornthwaite (1948), possui clima úmido com pequena ou nenhuma deficiência hídrica, e de acordo com a classificação de Köppen (1936) é considerado um clima tropical chuvoso de floresta, com ausência de estação seca, com pluviosidade média anual de até 1500mm e temperaturas acima de 18° (MATOS, 2020). O bioma predominante é a Mata Atlântica, cobrindo integralmente o território do município (VEIGA, 2018).

3.2. Compilação e processamento de dados

Os dados cartográficos utilizados para composição dos critérios de fragilidade ambiental foram obtidos através de repositórios e bases de metadados públicos, garantindo a acessibilidade e a replicabilidade dos resultados ao permitir que outros pesquisadores também acessem e verifiquem os dados. As fontes dos dados obtidos podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tipos e fontes dos dados utilizado para composição dos critérios avaliados.

Documentos cartográficos					
Produto	Fonte dos dados	Escala	Projeção	Formato	Data
Mapa de declividade	SRTM TOPODATA 30M - CARTA 16_405	1:250.000	UTM	GEOTIFF	2011
Mapa de dissecação do relevo					
Mapa de erosividade das chuvas	Banco de Dados Meteorológicos do INMET NASA POWER	3 estações meteorológicas	-	CSV	2000 - 2020
Mapa de uso e ocupação do solo	MapBiomas - Coleção 8	1:250.000	UTM	GEOTIFF	2022
Mapa pedológico	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA)	1:1.000.000	UTM	VETORIAL	2004

Fonte: Organizado pelo autor.

Após obtidos os dados base para construção dos critérios de avaliação, o processamento dos dados e a composição dos mapas temáticos se deu através do software QGIS *ver.* 3.16 *Hannover*.

O procedimento para a produção dos Mapas de Fragilidade Ambiental foi elaborado em cinco etapas, sendo elas:

- I. Transformação de documentos cartográficos de cada critério de fragilidade em dados *raster*, para padronização do processamento. A unidade básica de informação de cada *raster* é o pixel, onde foi adotado uma resolução espacial de 30 x 30m para cada pixel de cada *raster*;
- II. Classificação do índice de cada critério de fragilidade ambiental, de acordo com o que foi proposto por Ross (1994) e adaptado por outros autores. A escala utiliza categorias de influência variando de 1 (muito fraca) a 5 (muito forte);
- III. Hierarquização dos critérios de fragilidade através do método AHP, definindo o peso de importância para cada fator avaliado em uma comparação par a par;
- IV. Elaboração do Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado, através do cálculo *raster* de todos os critérios de fragilidade, com seus respectivos pesos;
- V. Elaboração do Mapa de Fragilidade Ambiental pela Média Aritmética, através do cálculo do valor médio entre todos os mapas, descartando a atribuição de pesos de importância.

3.3. Mapas de declividade e dissecação do relevo

A classificação dos mapas de fragilidade relacionados aos critérios de declividade e dissecação do relevo foram elaborados com base na missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), onde os dados foram processados pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil – TOPODATA. O Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido possui resolução espacial de 30m, inserido na Carta 16_405.

Para o critério Declividade, a classificação foi feita de acordo com Ross (1994), onde terrenos com maior grau rugosidade topográfica indicam maior propensão aos processos erosivos, como deslizamentos de terra e inundações, enquanto áreas mais planas estão menos propensas à perda de solo. A escala se inicia no valor 1 (muito baixo) para uma declividade entre 0 e 6%, e termina no valor 5 (muito forte) para variações no terreno acima de 30%, como pode ser analisado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do Índice de Fragilidade Ambiental para o critério declividade do terreno.

Índice de Fragilidade para o critério Declividade		
Graus de Fragilidade	Escala	Declividade (%)
Muito fraco	1	0-6
Fraco	2	6-12
Médio	3	12-20
Forte	4	20-30
Muito forte	5	>30

Fonte: Ross (1994).

Guimarães et al. (2017) e Lima (2018) propuseram modelos de automatização do cálculo do Índice de fragilidade ambiental para o critério dissecação do relevo, tornando a rotina metodológica reproduzível a partir de um MDE, iterando os dados obtidos, pixel por pixel. O modelo adotado para este trabalho propõe quatro etapas para a obtenção do critério de dissecação do relevo: inicia-se com o tratamento inicial do MDE; após faz-se o mapeamento da dimensão interfluvial média ou Dissecação Horizontal (DH) e do mapeamento do grau de entalhamento dos vales ou Dissecação Vertical (DV); e finaliza com o cruzamento destes dois últimos produtos, obtendo-se os resultados como categorias morfométricas matriciais propostas por Ross (1994), exemplificadas na Tabela 3.

Para a obtenção do mapa da dimensão interfluvial média, ou DH, é feito o cálculo da distância média entre os divisores de água, ou interflúvios, que são definidos como as ondulações que separam os vales (GUERRA, 1993). Para obtenção do mapa do grau de entalhamento dos vales, ou DV, foi utilizado a amplitude do relevo descrita por Guerra (1993), em que a Dissecação Vertical é obtida pela diferença entre os dois pontos de maior e menor altitude dentro de uma área amostral, possuindo relação direta com o grau de aprofundamento dos canais de drenagem.

De acordo com a metodologia proposta por Lima (2018), para a síntese da DH e DV, o MDE tratado é utilizado como fundação, onde a partir dele se calcula: a direção e o acúmulo de fluxo, para delimitação das bacias e microbacias; a amplitude altimétrica e a área das microbacias na região de estudo; o perímetro, o comprimento axial e a largura média da microbacia.

Para determinar a DV, é utilizada a amplitude altimétrica, ou seja, o intervalo entre a cota altimétrica de cada pixel em comparação com a cota altimétrica mais elevada registrada dentro da região de elevação em comparação. Como forma de classificação, de acordo com o estabelecido por Ross (1994), o grau de entalhamento

dos vales é representado pelo valor 1 (muito fraco) caso essa amplitude seja menor que 20m, e valor 5 (muito forte) caso a amplitude seja maior que 160m. A escala completa pode ser observada nas linhas da Tabela 3.

Para obter o comprimento axial da bacia, foi utilizada a Equação (1):

$$L = \frac{Pr}{2} \quad (1)$$

Onde:

L – Comprimento axial da microbacia (m);

Pr – Perímetro da microbacia (m).

A largura média da bacia foi obtida Equação (2):

$$\bar{L} = \frac{A}{L} \quad (2)$$

Onde:

\bar{L} – Largura média da microbacia (m);

A – Área da bacia (m²);

Sabendo-se que a largura da bacia representa uma linha reta perpendicular ao trilho do talvegue, então a largura média da microbacia representa a distância média entre os interflúvios de uma bacia ou microbacia (GUERRA, 1993). Assim, é possível inferir que a dimensão interfluvial média ou Dissecação Horizontal é igual à largura média da microbacia, representada pela Equação (3):

$$DH = \bar{L} \quad (3)$$

Onde:

DH – Dissecação Horizontal ou dimensão interfluvial média (m);

Assim como na classificação da DV, foi adotado um nivelamento de valor 1 (muito baixa) para dimensões interfluviais maiores que 3.750m, e valor 5 (muito alta) para valores menores que 250 m, conforme Tabela 3.

A matriz do Índice de Dissecação do Relevo (IDR) é o parâmetro utilizado para classificar a interação entre a DV e DH. O índice é composto por dois dígitos, onde o primeiro representa a classificação do grau de entalhamento dos vales e o segundo representa a dimensão interfluvial.

Tabela 3 – Matriz para determinação do Índice de Dissecação do Relevo.

Matriz dos índices de dissecação do relevo (IDR)					
Grau de entalhamento dos vales (DV)	Dimensão interfluvial média (DH)				
	Muito baixa (1) > 3750m	Baixa (2) 1750 - 3750m	Média (3) 750 - 1750m	Alta (4) 250 - 750m	Muito alta (5) < 250m
Muito fraco (1) < 20m	11	12	13	14	15
Fraco (2) 20 - 40m	21	22	23	24	25
Médio (3) 40 - 80m	31	32	33	34	35
Forte (4) 80 - 160m	41	42	43	44	45
Muito forte (5) > 160m	51	52	53	54	55

Fonte: Ross (1994).

Para a classificação do índice de fragilidade ambiental para o critério dissecação do relevo, foi utilizado o modelo proposto por Guimarães et al. (2017), onde as categorias morfométricas obtidas na matriz do IDR (Tabela 3) foram hierarquizadas de acordo com seu grau de fragilidade, partindo do valor 1 (muito fraco) e finalizando com valor 5 (muito forte). Esta classificação pode ser visualizada na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação do Índice de Fragilidade Ambiental para o critério dissecação do relevo.

Índice de fragilidade para o critério dissecação do relevo		
Graus de fragilidade	Escala	Categorias morfométricas
Muito fraco	1	11, 12, 13, 21, 22
Fraco	2	14, 15, 23, 24, 25, 35
Médio	3	32, 33, 34
Forte	4	31, 41, 42, 43, 44, 51, 52, 53
Muito forte	5	45, 54, 55

Fontes: Guimarães et al. (2017).
Adaptado de Ross (1994).

Para melhor representação, a matriz do IDR foi interpolada com a classificação do índice de fragilidade ambiental para o critério dissecação do relevo, conforme ilustra a Figura 2.

Modelo adaptado por Guimarães et al. (2017).					Modelo proposto por Ross (1994).				
11	12	13	14	15	11	12	13	14	15
21	22	23	24	25	21	22	23	24	25
31	32	33	34	35	31	32	33	34	35
41	42	43	44	45	41	42	43	44	45
51	52	53	54	55	51	52	53	54	55

Fontes: Guimarães et al. (2017).
Adaptado de Ross (1994).

Figura 2 – Comparativo entre os modelos de Guimarães et al. (2017) e Ross (1994).

3.4. Mapa de erosividade das chuvas

O mapa de erosividade das chuvas foi elaborado a partir da série histórica dos dados meteorológicos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela plataforma de base de dados NASA POWER (Acesso em: <http://power.larc.nasa.gov/>) em escala diária, com resolução de 1° latitude por 1° longitude. Foram usadas duas estações convencionais do INMET localizadas próximas à área de estudo e nos locais mais próximos, e para o município em questão utilizou-se os dados do NASA POWER, uma vez que não possuía estação convencional. Assim, utilizou-se uma série de precipitação total mensal correspondente a 20 anos de observação para calcular a média mensal do índice de erosividade das chuvas (EI30Mês). Esse critério de fragilidade ambiental também é utilizado na Equação Universal de Perda de Solo (USLE), denominado como “Fator R”.

O índice mensal de erosividade, ou Fator R, foi calculado por meio da Equação (4), proposta por Lombardi e Moldenhauer (1992).

$$R = EI30Mês = 68,73 * \left(\frac{Mx^2}{P} \right)^{0,841} \quad (4)$$

Onde:

R – Fator R ou índice de erosividade das chuvas;

EI30Mês – Média mensal do índice de erosividade das chuvas (MJmmha⁻¹h⁻¹);

Mx – Média da precipitação pluviométrica mensal (mm);

P – Precipitação média anual (mm).

A metodologia para classificação do índice de fragilidade ambiental para o critério erosividade das chuvas foi baseada na proposição de Crepani et al. (2001), sendo que, para adequação à escala proposta por Ross (1994), os valores de fragilidade foram normalizados para comportar os graus de fragilidade de 1 (muito fraco) a 5 (muito forte), conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação do Índice de Fragilidade Ambiental para o critério erosividade das chuvas.

Índice de fragilidade para o critério erosividade das chuvas		
Graus de fragilidade	Escala	Erosividade das chuvas (MJmmha⁻¹h⁻¹)
Muito fraco	1	< 150
Fraco	2	150-250
Médio	3	250-350
Forte	4	350-450
Muito forte	5	> 450

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

3.5. Mapas de uso e ocupação do solo e pedologia

Para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo, foi utilizado como base o *raster* de cobertura do solo elaborado pelo projeto MapBiomass Coleção 8, correspondente ao ano de 2022. O projeto MapBiomass (SOUZA et al., 2020) classifica as tipologias de cobertura do solo para o Brasil, sendo feito um recorte para a área de estudo.

Para adaptar todas as diferentes formações classificadas aos diferentes graus de fragilidade ambiental, foi utilizada como base os códigos de legendas disponibilizados pelo projeto MapBiomass, Assim, as formações florestais, naturais, agrossilvipecuárias e antrópicas foram associadas com o índice de fragilidade ambiental, variando de um valor 1 (muito fraco) ao valor 5 (muito forte) de acordo com Ross (1994), podendo ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação do Índice de Fragilidade Ambiental para o critério uso e ocupação do solo.

Índice de fragilidade para o critério uso e ocupação do solo		
Graus de fragilidade	Escala	Tipo de uso e ocupação do solo
Muito fraco	1	Floresta e matas naturais
Fraco	2	Formações naturais não florestais e reflorestamento
Médio	3	Pastagem, silvicultura e culturas de ciclo longo
Forte	4	Culturas de ciclo curto e arroz irrigado
Muito forte	5	Área desmatada, área urbana, mineração, solo exposto, queimada e banco de areia

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

O mapa de fragilidade ambiental para o critério pedologia foi elaborado utilizando o arquivo vetorial de classes de solo disponibilizado pelo Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA), que é a autarquia estadual executora da política de meio ambiente no estado da Bahia. O arquivo vetorial, em formato *shapefile*, foi reprojeto para o Sistema de Referências de Coordenadas (SRC) utilizado neste trabalho, e em sequência, feito o recorte dos limites para a área de estudo.

A metodologia para hierarquização das classes de solo de acordo com o índice de fragilidade ambiental foi adaptada da proposição de Crepani et al. (2001), onde o autor utilizou a classificação de solos da Embrapa (SANTOS, 2018), que é a mesma utilizada pelo INEMA. Assim como os fatores definidos anteriormente, os graus do índice de fragilidade foram normalizados para a escala de Ross (1994) e então classificados a partir do valor 1 (muito fraco) até o 5 (muito forte), em que quanto mais alto o valor, maior a fragilidade dessa classe de solo aos processos erosivos (Tabela 7).

Tabela 7 – Classificação do Índice de Fragilidade Ambiental para o critério uso e ocupação do solo.

Índice de Fragilidade para o critério Pedologia/Classe de solo		
Graus de Fragilidade	Escala	Classe de solo
Muito fraco	1	Latossolos
Médio	3	Argissolos, Luvisolos, Chernossolos, Planossolos, Espodossolos
Forte	4	Cambissolos
Muito forte	5	Neossolos, Vertissolos, Organossolos, Gleissolos, Plintossolos, Afloramentos Rochosos, Solo de Manguê

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

3.6. Definição dos pesos de importância através do processo hierárquico analítico

Definidos os cinco critérios para avaliação do índice de fragilidade ambiental, foi proposto uma definição dos pesos de importância de cada fator quanto à sua capacidade de promover o processo erosivo, ou o quanto esse critério em avaliação tem relação com o potencial de causar a fragilidade daquele ambiente em comparação aos outros. O modelo utilizado para os critérios em confronto foi o processo hierárquico analítico (AHP) proposto por Saaty (1980).

A obtenção dos pesos de cada critério foi feita a partir de uma pesquisa de opinião de diversos especialistas das áreas correlatas a esse estudo, onde a partir de

um formulário estruturado, cada um deles, com base na sua experiência técnico-científica, atribuiu uma nota que refletia a importância relativa de um critério sobre o outro, no contexto da fragilidade ambiental. Todos os critérios se confrontavam entre si, possibilitando uma análise comparativa para determinar a contribuição relativas de cada critério para o índice de fragilidade.

A Tabela 8 indica os especialistas que participaram do formulário.

Tabela 8 – Especialistas consultados e suas respectivas especialidades e área de atuação, em ordem de resposta.

Especialistas consultados para ponderação dos critérios de fragilidade ambiental		
Especialista	Especialidade	Área de atuação
1	Recursos Hídricos	Engenharia de irrigação; manejo da água na agricultura irrigada; manejo de água, solo e planta em ambientes salinos; hidrologia; agrometeorologia
2	Ciências Florestais	Hidrologia; sensoriamento remoto; modelagem estatística
3	Hidrologia	Irrigação; topografia e georreferenciamento de imóveis rurais; hidrologia; modelagem hidrológica; irrigação pressurizada
4	Hidrologia	Hidrologia, meteorologia e climatologia; hidráulica; gestão de bacias hidrográficas; modelagem hidrológica e hidrossedimentológica
5	Hidráulica; Hidrologia; Geoprocessamento	Dimensionamento de obras hidráulicas em estradas não pavimentadas; dimensionamento e avaliação de terraços de retenção; modelagem hidrológica; desenvolvimento de tecnologia para apoio a projetos de conservação de água e solo
6	Ciências Florestais	Licenciamento ambiental; geoprocessamento e topografia; regularização ambiental; uso de drones em levantamentos ambientais; arborização urbana; ecologia florestal; sensoriamento remoto
7	Física do Solo	Disponibilidade hídrica; perda de água; manejo da irrigação; dinâmica da água e perda de solo; levantamento e classificação de solos
8	Ecologia Florestal; Recursos Naturais; Botânica	Fitossociologia; florística; dinâmica florestal
9	Modelagem Espacial	Sensoriamento remoto; ciência de dados espaciais; modelagem espacial

Fonte: Organizado pelo autor.

Os especialistas receberam uma sequência de perguntas de múltipla escolha, onde foi pedido para quantificar a intensidade da importância em que o primeiro critério descrito se relaciona com o segundo critério, em uma escala de notas. Esse nivelamento em notas foi proposto por Saaty (1980), em que o valor 1 da escala representa a igualdade de importância entre os critérios em confronto, e o valor 9 representa a extrema importância do primeiro critério sobre o segundo. Neste

trabalho, decidiu-se incluir a nota 0 para quando o especialista não observar relação ou não puder estabelecer uma forma de comparar os critérios descritos. Na Tabela 9 encontra-se o sistema de atribuição de notas por completo.

Tabela 9 – Escala numeral das notas atribuídas pelos especialistas entre os critérios em confronto.

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Ambos os critérios são de igual importância	Os dois critérios contribuem igualmente para a fragilidade ambiental
3	Moderada importância do primeiro critério sobre o segundo	A experiência técnico-científica do especialista indica que o primeiro critério contribui moderadamente a mais para a fragilidade ambiental do que o segundo critério
5	Forte importância do primeiro critério sobre o segundo	A experiência técnico-científica do especialista indica que o primeiro critério contribui consideravelmente a mais para a fragilidade ambiental do que o segundo critério
7	Importância muito forte do primeiro critério sobre o segundo	O primeiro critério exerce dominância sobre o segundo critério ao considerar as causas da fragilidade ambiental
9	Extrema importância do primeiro critério sobre o segundo	O especialista afirma que o primeiro critério exerce absoluta dominância sobre o segundo critério ao considerar as causas da fragilidade ambiental.
0	O especialista não observa associação entre os critérios	Os critérios em confronto não podem ser comparados par a par
2, 4, 6, 8 e decimais	Valores utilizados pelo autor para balizamento entre as opiniões dos especialistas	

Fonte: Adaptado de Saaty (2008).

Após definidos os parâmetros de atribuição de notas e com os resultados obtidos a partir do embasamento técnico-científico dos especialistas, foi possível confeccionar a matriz de análise par a par. Essa matriz estabelece a relevância relativa de cada critério da coluna em relação a cada critério correspondente na linha, onde quando em comparação com ele mesmo, o resultado sempre será 1. Assim, o primeiro critério em confronto descrito no formulário representará a coluna, e o segundo critério, a linha.

Diametricamente, se a nota atribuída ao confronto entre os critérios x e y for 9, de acordo com o “Pressuposto da reciprocidade” (SAATY, 2008) o resultado do confronto y com x é $1/9$, automatizando o preenchimento da matriz. Da mesma forma, se o resultado do confronto entre os critérios x e y for 1, o reverso também será verdadeiro, descrito por Saaty (2008) como “Pressuposto da homogeneidade”.

Para atribuição final da intensidade de importância, foi utilizada a média aritmética entre as notas de cada especialista. Caso o especialista tenha respondido

que não observa relação entre os critérios (valor 0), sua nota não será computada, assim não afetando as ponderações dos outros especialistas.

O processo para calcular o peso de importância ou Autovetor (w) dos critérios de fragilidade ambiental segue os seguintes passos:

- I. Somatória dos valores de cada coluna da matriz de comparação pareada, gerando uma linha com cinco valores, respectivos à cada critério;
- II. Normalização das notas atribuídas pelos especialistas: as células de cada coluna da matriz de comparação pareada são divididas pela somatória de coluna descrita no passo I., obtendo-se a matriz ponderada das avaliações;
- III. Autovetor (w) ou peso de importância para cada critério: obtido pela média aritmética de cada linha da matriz ponderada.

De forma a garantir credibilidade e coerência aos pesos de importância calculados, Saaty (1980) propõe o “Pressuposto da consistência” como forma de validar as escolhas dos especialistas, ou seja, as notas atribuídas aos confrontos de critérios devem refletir uma relativa lógica e evitar contradições internas. O Índice de Consistência (IC) e a Razão de Consistência (RC) foram propostos por Saaty (1980) para quantificar a confiabilidade dos resultados, onde valores de RC superiores a 0,1 (10%) sugerem que a consulta ao especialista que ultrapassou esse limite deve ser refeita, avaliando as possíveis contradições (FRANÇA et al., 2019).

A Razão de Consistência (RC) foi calculada a partir da Equação (5):

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (5)$$

Onde:

RC – Razão de Consistência;

IC – Índice de Consistência;

IR – Índice Randômico proposto por Saaty (1991).

O Índice Randômico (IR) proposto por Saaty (1991) foi determinado pelo valor constante dependente da quantidade de critérios em avaliação, que neste caso, foram cinco critérios (Tabela 10).

Tabela 10 – Índice Randômico de Saaty (IR) para o número n de critérios avaliados.

Índice randômico de Saaty							
Número de critérios avaliados (n)	1	2	3	4	5	6	(...)
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,32	(...)

Fonte: Saaty (1991).

Para o cálculo do Índice de Consistência (IC), foi adotada a equação (6):

$$IC = \frac{\lambda Max - n}{n - 1} \quad (6)$$

Onde:

IC – Índice de Consistência;

λMax – Autovalor máximo ou Número principal de Eigen;

n – Número de critérios avaliados.

O Autovalor máximo (λMax) ou Número principal de Eigen foi obtido por meio da Equação (7):

$$\lambda Max = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]_i}{w_i} \quad (7)$$

Onde:

$[Aw]_i$ – Produto matricial de cada linha da matriz de comparação pareada com o respectivo Autovetor (w) de cada critério de fragilidade ambiental;

w_i – Respectivo Autovetor (w) de cada critério de fragilidade ambiental.

3.7. Mapa de Fragilidade Ambiental

Após o desenvolvimento dos critérios de declividade, dissecação do relevo, erosividade das chuvas, uso e ocupação do solo e pedologia/classe de solo, e aplicados os seus respectivos pesos de importância, foi elaborado o mapa final de fragilidade ambiental.

Para a confecção do mapa final, foi utilizada a função *raster calculator* do software QGIS ver. 3.16 *Hannover*, onde o software realiza o cálculo de cada *raster* e seus respectivos pesos de importância de maneira automatizada. Para padronizar o resultado final e manter a coerência quanto ao tamanho total dos *raster*, as dimensões nos eixos X e Y de todos mapas foram estabelecidas em 1821 x 2161 pixels, garantindo que todos os mapas contêm a mesma quantidade de informações.

A equação utilizada na calculadora *raster* para a obtenção do Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado (MFP), pode ser visualizada na Equação (8).

$$MFP = (MDV * w_1) + (MDR * w_2) + (MEC * w_3) + (MUO * w_4) + (MPE * w_5) \quad (8)$$

Onde:

MFP – Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado;

MDV – Mapa para o critério declividade;

MDR – Mapa para o critério dissecação do relevo;

MEC – Mapa para o critério erosividade das chuvas;

MUO – Mapa para o critério uso e ocupação do solo;

MPE – Mapa para o critério pedologia;

w_i – Autovetor (w) ou peso de importância para o respectivo critério.

Alternativamente, para o fator de comparação e para avaliar os efeitos dos pesos de importância estabelecidos pelos especialistas, foi gerado um Mapa de Fragilidade Ambiental pela Média Aritmética (MFMA). O MFMA pressupõe que todos os critérios em avaliação possuem igual relevância para a fragilidade ambiental da área de estudo, não sendo computados os pesos de importância definidos pela matriz do processo hierárquico analítico (AHP).

O MFMA foi executado pela Equação (9):

$$MFMA = \frac{MDV + MDR + MEC + MUO + MPE}{5} \quad (9)$$

Onde:

MFMA – Mapa de Fragilidade Ambiental pela Média Aritmética;

MDV – Mapa para o critério declividade;

MDR – Mapa para o critério dissecação do relevo;

MEC – Mapa para o critério erosividade das chuvas;

MUO – Mapa para o critério uso e ocupação do solo;

MPE – Mapa para o critério pedologia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O município de Porto Seguro apresenta classes de relevo predominantes variando entre 3 – 8% de declividade, totalizando 28,13% do seu território, também observando o predomínio de classes mais baixas de declividade. Por outro lado, terrenos mais declivosos também fazem parte da paisagem, onde cerca de 44% do território do município possui declividade entre Ondulado e Forte Ondulado, como pode ser analisado na Figura 3.

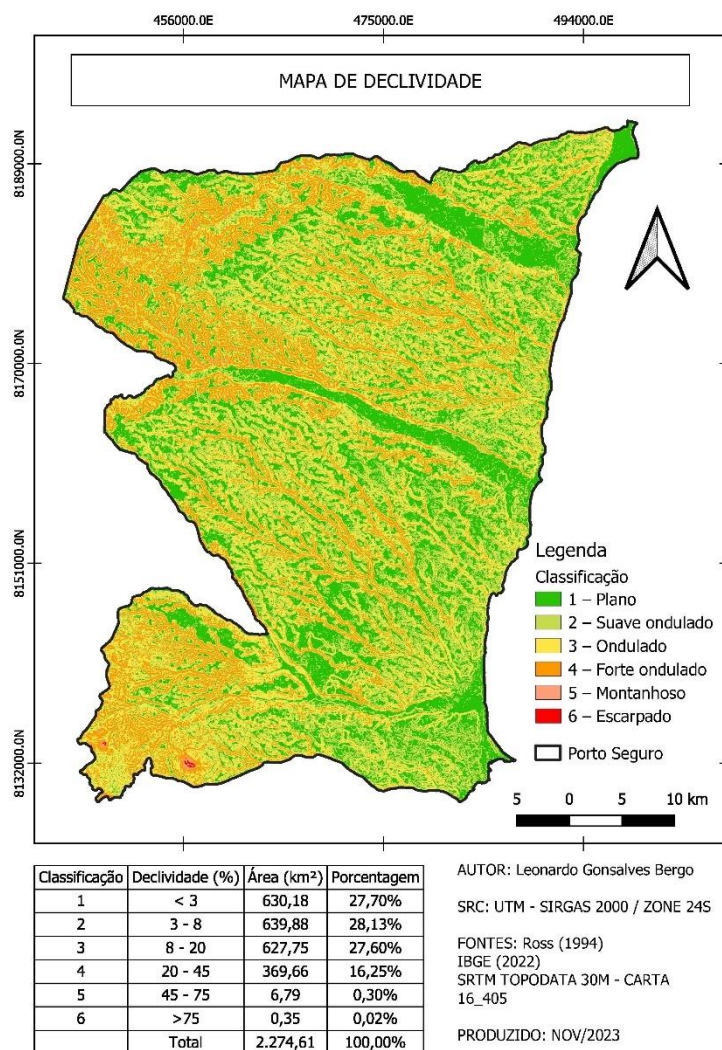


Figura 3 – Mapa das classes de declividade do solo para o município de Porto Seguro.

Áreas que registram baixos índices de declividade desfrutam de diversas vantagens, incluindo uma reduzida taxa de erosão do solo, o que preserva sua fertilidade e integridade. Essas declividades mais suaves também facilitam as práticas agrícolas, permitindo operações mais eficientes e menos impacto ambiental (MATOS, 2016).

Ao avaliar a fragilidade ambiental para o critério declividade, de acordo com o proposto por Ross (1994), as classes de relevo encontradas na área de estudo contribuem pouco para os processos erosivos, onde 47,55% da extensão territorial do município foi classificada com o índice 1 (muito fraco), seguido por 20,33% de cobertura do índice 2 (fraco). A Figura 4 ilustra e quantifica a extensão do território ocupado por cada um dos índices de fragilidade do critério declividade.

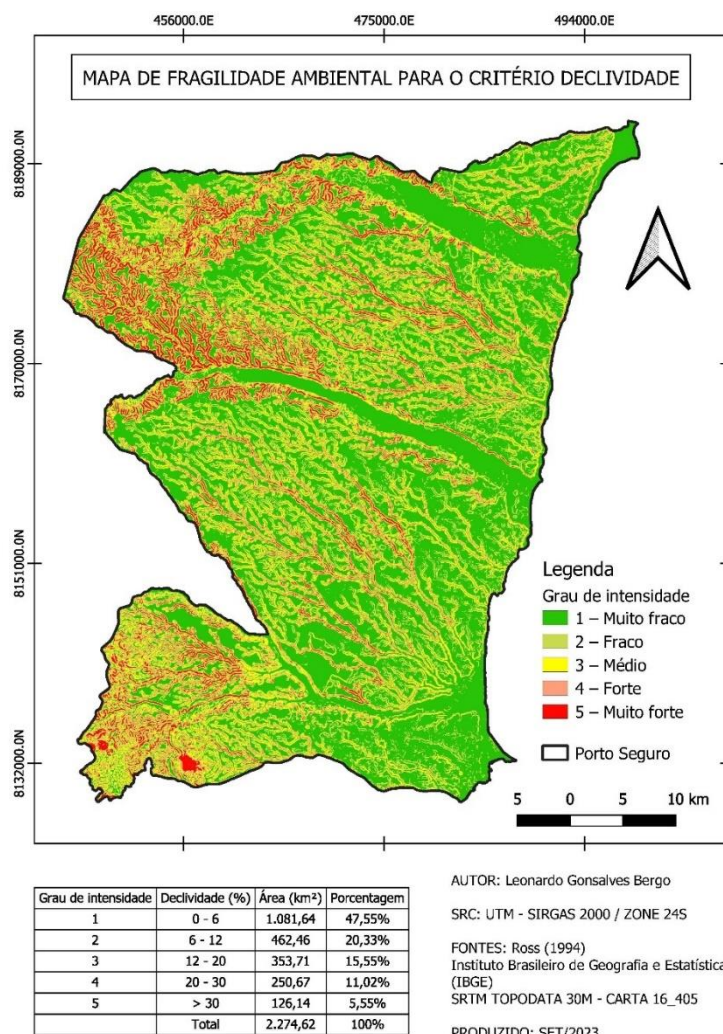


Figura 4 – Dissecação Vertical (A) e Dissecação Horizontal (B) caracterizadas para a área de estudo.

Ao analisar a Dissecação Vertical, observou-se um predomínio de uma faixa entre 20 e 80m do grau de entalhamento dos vales, considerados índices moderados de potencial erosivo. Em áreas com índices baixos de entalhamento dos vales, os mesmos tendem a ter uma configuração mais suave, com menor profundidade. Isso pode indicar uma menor incidência de processos erosivos significativos, proporcionando maior estabilidade ao solo (GUIMARÃES et al., 2017).

Por outro lado, índices altos de entalhamento indicam vales mais profundos e extensos, aumentando a susceptibilidade à erosão hídrica especialmente em encostas íngremes. A água da chuva, ao escorrer por esses vales, pode ganhar velocidade, aumentando o potencial erosivo (CREPANI et al., 2001).

Ao tratar da Dissecação Horizontal, foi observada uma predominância absoluta de interflúvios menores que 250 m, correspondendo à cerca de 90% da área do estudo. A proximidade dos vales facilita o rápido acúmulo e transporte de água, aumentando significativamente o potencial erosivo da região. Na Figura 5 encontram-se os mapas para a Dissecação Vertical e Horizontal, respectivamente.

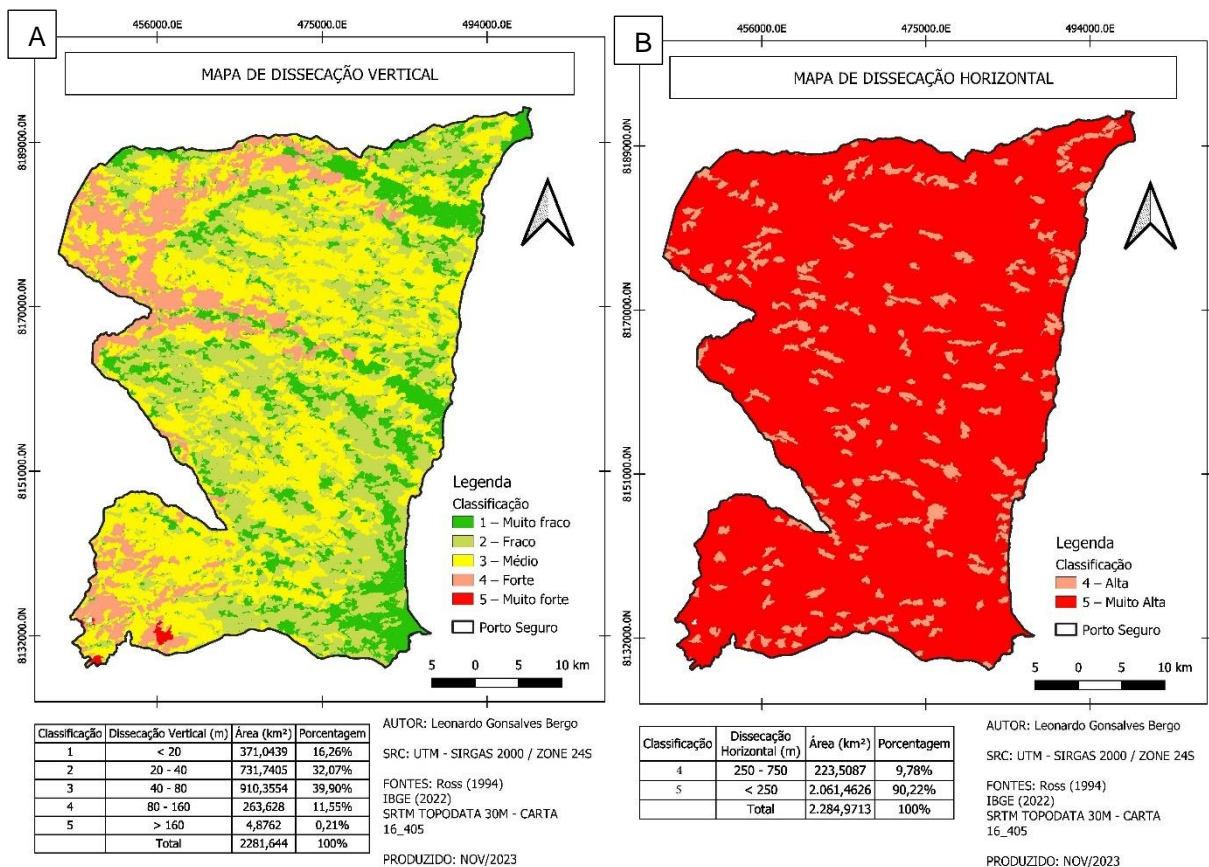
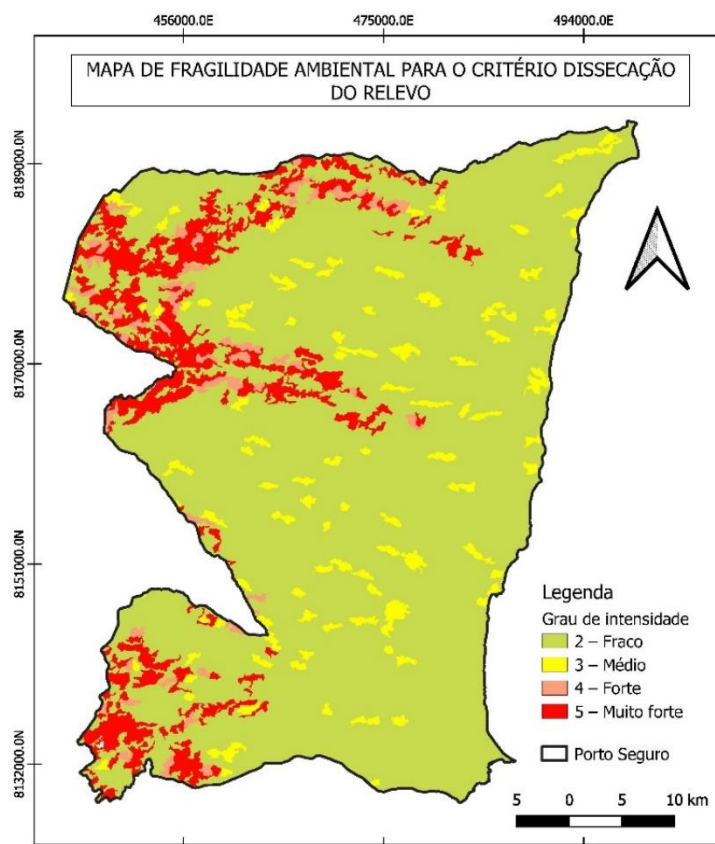


Figura 5 – Dissecação Vertical (A) e Dissecação Horizontal (B) caracterizadas para a área de estudo.

A metodologia proposta por Guimarães et al. (2017) caracteriza o mais alto grau de fragilidade apenas para as áreas com vales extremamente entalhados e com a sua dimensão interfluvial mais curta, formando uma paisagem em “V”. A diferença para a metodologia proposta por Ross (1994) consiste em que o referido autor considera

categorias morfométricas muito distintas em uma mesma classe de fragilidade ambiental.

O grau de intensidade 2 (fraco) foi predominante na área estudada, correspondendo com cerca de 82% do território do município (Figura 6). Esse fato pode ser corroborado pelo mapa de declividade (Figura 3), que também apresentou baixos índices de rugosidade do relevo para a área de estudo. As áreas com o fator mais forte de fragilidade ambiental se encontram nos morros e nas áreas de convergência dos rios e cursos d'água, onde o relevo é naturalmente mais dissecado.



Grau de Intensidade	Categorias morfométricas	Área (km²)	Porcentagem
2	14, 15, 23, 24, 25, 35	1.883,49	82,42%
3	32, 33, 34	120,71	5,28%
4	31, 41, 42, 43, 44, 51, 52, 53	53,87	2,36%
5	45, 54, 55	227,04	9,94%
	Total	2.285,11	100,00%

AUTOR: Leonardo Gonsalves Bergo
 SRC: UTM - SIRGAS 2000 / ZONE 24S
 FONTES: Ross (1994)
 Guimarães et al. (2017)
 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
 SRTM TOPODATA 30M - CARTA 16_405
 PRODUZIDO: NOV/2023

Figura 6 – Dissecação Vertical e Dissecação Horizontal caracterizadas para a área de estudo.

O mapa de erosividade das chuvas avalia o potencial erosivo da pluviosidade dentro da área estudada. Devido à sua relevância na avaliação do processo erosivo em todas as suas etapas, é essencial destacar a energia cinética, proveniente da ação das gotas de chuva, que introduz dinamismo ao sistema, desencadeando a

desagregação, dispersão e transporte de partículas do solo por meio do escoamento superficial (SILVA et al., 2023).

Foram encontrados valores de erosividade variando entre 412,9 a 427,9 MJmmha⁻¹h⁻¹ (Figura 7). Esse índice que é dependente da pluviometria e das características climáticas da região de estudo é considerado alto.

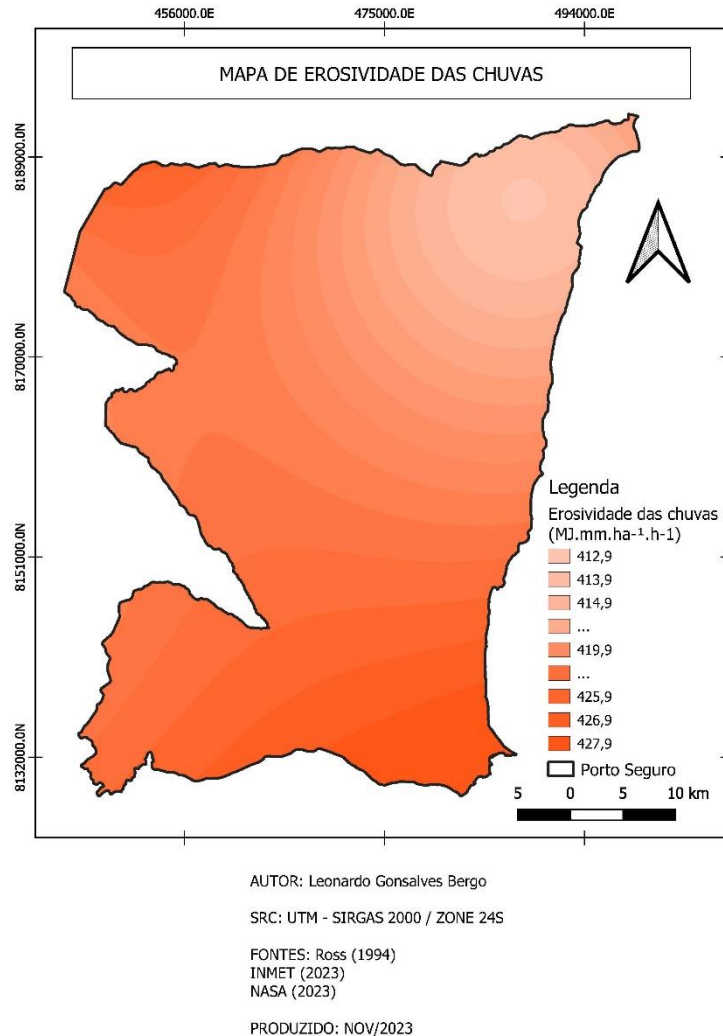
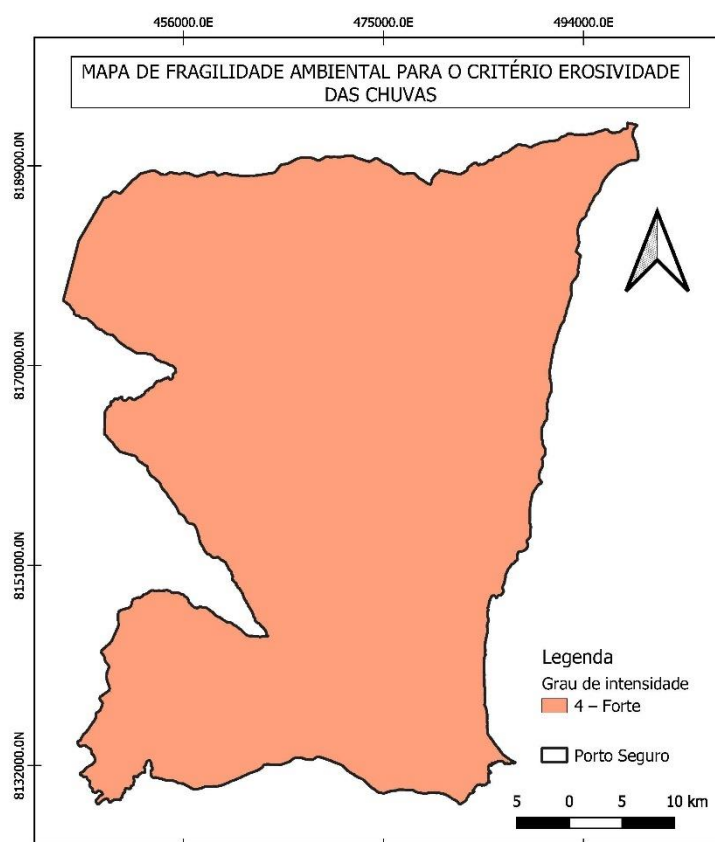


Figura 7 – Índice de Erosividade da chuva para o município de Porto Seguro.

O mapa de fragilidade ambiental para o critério erosividade das chuvas, produto do mapa avaliado na Figura 7, indicou que o município de Porto Seguro está integralmente classificado no grau de fragilidade 4 (forte). A categoria compreende os índices de erosividade da chuva entre 350 e 450 MJmmha⁻¹h⁻¹. Esse valor pode ser reflexo da ausência de dados pluviométricos históricos, onde para as estações mais próximas de Porto Seguro, as áreas foram classificadas com o índice 5 (muito forte).

O mapa de fragilidade ambiental para o critério erosividade das chuvas pode ser observado na Figura 8.



Grau de intensidade	Erosividade das chuvas (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹)	Área (km ²)	Porcentagem
4	350-450	2.285,30	100%
Total		2.285,30	100%

AUTOR: Leonardo Gonsalves Bergo
 SRC: UTM - SIRGAS 2000 / ZONE 24S
 FONTES: Ross (1994)
 INMET
 NASA
 PRODUZIDO: NOV/2023

Figura 8 – Mapa de fragilidade ambiental para o critério erosividade das chuvas

Para a caracterização dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo para a área estudada, foi elaborado um mapa contendo as oito tipologias mais frequentes (Figura 9). Observou-se que uma grande parcela do município (cerca de 42%) está recoberta por vegetação florestal nativa, fato motivado pela presença do Parque Nacional do Pau Brasil, localizado mais ao norte, e pelo Parque Nacional e Histórico do Monte Pascoal, no extremo sul do município.

Também foi observado que aproximadamente 28% da área de estudo está recoberta por pastagens, concentradas em locais menos declivosos e com menor dissecação. Vale destacar que a silvicultura é altamente presente, entretanto sua distribuição está apenas concentrada na região mais central do município, ocupando

um total de 260,82 km² (11,42%). Destacou-se também a cafeicultura, principal cultivo agrícola do município, que ocupa uma área de 19,82 km² ou 0,87% (Figura 9).

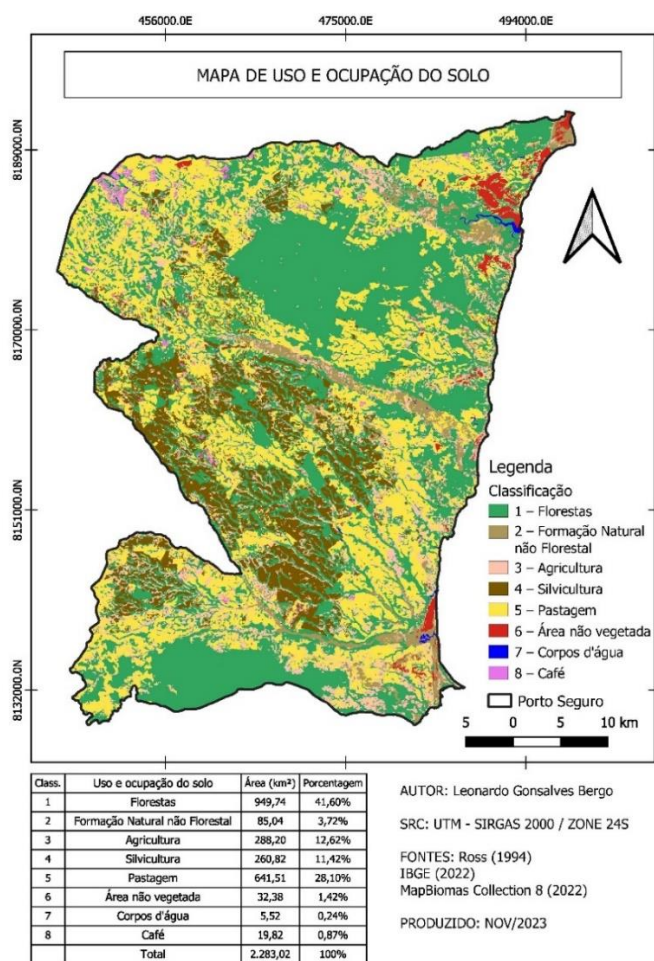


Figura 9 – Mapa de uso e ocupação do solo para o município de Porto Seguro.

O mapa de fragilidade ambiental para o critério uso e ocupação do solo apresentou uma grande extensão de área bem conservada (cerca de 42%), caracterizada pelo grau de intensidade 1 (muito fraco), devido à presença abundante de florestas e matas que não sofreram qualquer tipo de intervenção antrópica (Figura 10). Por outro lado, devido ao alto volume de áreas cobertas por pastagem, silvicultura e culturas de ciclo longo, a maioria da extensão territorial do município de Porto Seguro apresentou grau de fragilidade 3 (médio). As áreas que apresentaram o maior grau de fragilidade ambiental estão localizadas nas faixas de solo descoberto, bancos de areia, áreas urbanas e nas atividades de mineração, abrangendo cerca de 1,4% do município de Porto Seguro.

A conversão de áreas naturais para usos antrópicos pode aumentar a fragilidade ambiental devido à remoção da cobertura vegetal, alterações no ciclo

hidrológico e introdução de poluentes. Por outro lado, práticas sustentáveis de uso do solo podem contribuir para a resiliência ambiental, preservando ecossistemas e reduzindo os impactos negativos. Dessa forma, é possível inferir que a interação entre diferentes critérios de fragilidade ambiental com um solo exposto pode potencializar seus processos erosivos (NASCIMENTO et al., 2016).

Essas áreas antropizadas estão propensas à perda de solo pela ação do clima, onde a ausência de uma proteção superficial do solo aumenta o impacto causado pelas gotas da chuva e favorece o processo de erosão, geralmente mitigado pela barreira física da cobertura foliar e a estabilização do solo pelas raízes das árvores (CREPANI et al., 2001).

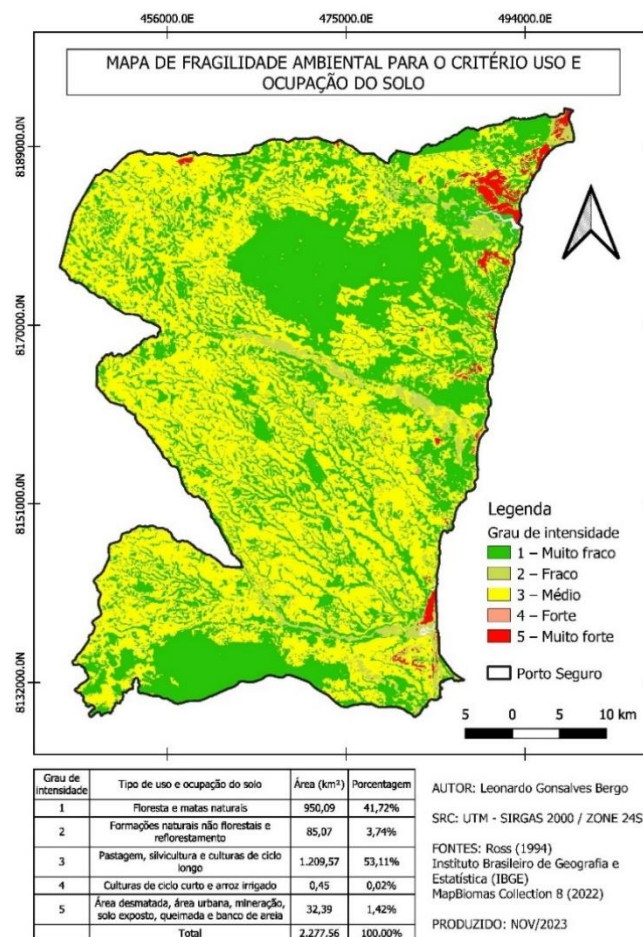


Figura 10 – Mapa de fragilidade ambiental para o critério uso e ocupação do solo.

Para a área de estudo, a classificação de solo mais abundante foi a do Latossolo Amarelo Distrófico, ocupando cerca de 80% do território do município (

Figura 11). Os Latossolos possuem avançado grau de evolução devido aos intensos processos de intemperismo que acarretaram sua formação, sendo também

muito profundos, bem drenados e geralmente encontrados em planícies ou áreas de relevo mais suave (SANTOS et al., 2018).

O Argissolo Amarelo Distrófico foi o segundo mais encontrado, em que sua área ocupa 6,7% da área de estudo. Por serem solos que variam de profundos a pouco profundos, menos estáveis e menos drenados, é inferido que possuem menor resistência aos processos erosivos (FRANCO et al., 2012; OLIVEIRA, 2008).

Os Gleissolos também apresentaram ocorrência similar aos Argissolos, abrangendo um percentual 5,7% da área de estudo. São solos naturalmente saturados por água, ocorrendo nas redes de drenagem dos cursos d'água (

Figura 11).

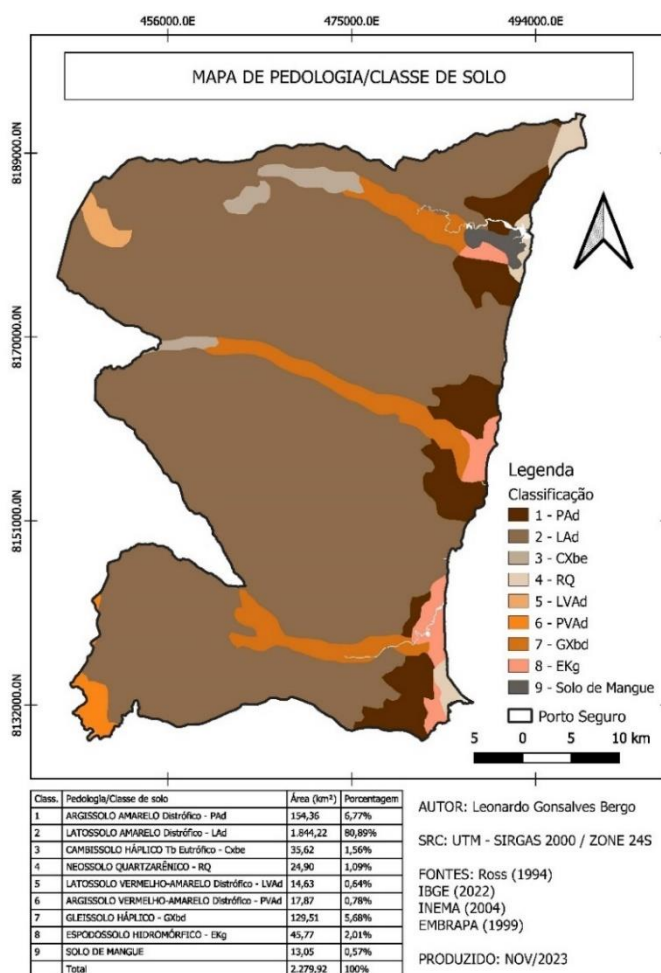


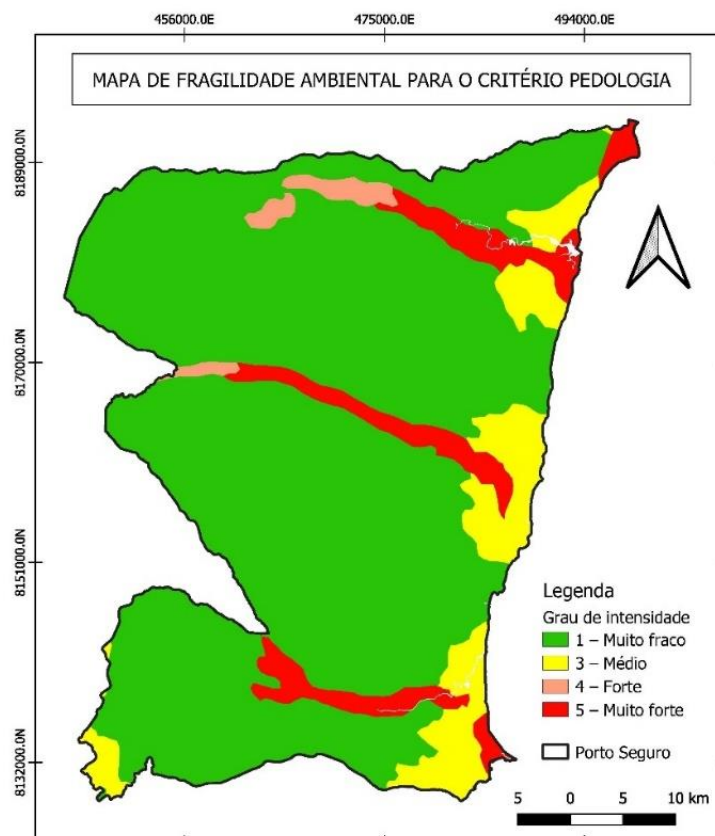
Figura 11 – Mapa de caracterização das classes de solo presentes na área de estudo.

O mapa de fragilidade ambiental para o critério pedologia identificou que 81,5% da extensão territorial do município apresenta fragilidade muito fraca quanto às classes de solo. Esse fato se deve à ampla distribuição de Latossolos no município

de Porto Seguro, que são solos considerados mais estáveis e menos propensos aos processos erosivos.

As áreas que apresentaram grau médio de intensidade quanto à fragilidade ambiental estão localizadas próximas ao litoral, abrangendo 9,56% da extensão do município. Os Argissolos foram os mais significativos para essa classificação, decorrente do fato de serem mais susceptíveis aos processos erosivos. Ao avaliar os graus forte e muito forte da classificação de intensidade quanto à fragilidade ambiental, constatou-se que os mesmos estão localizados no percurso dos cursos d'água até o desague no oceano, como em brejos extensos e as fozes, perfazendo uma área de 203,46 km², que representa 8,92% do território em estudo.

Esse maior grau de fragilidade é justificado por conta desses solos serem saturados por água que é um agente ativo no processo erosivo. São também pouco profundos e oriundos de uma formação recente, ou seja, são solos imaturos e menos estáveis.



Grau de intensidade	Classe de solo	Área (km ²)	Porcentagem
1	Latossolos	1.859,47	81,52%
3	Argissolos, Luvisolos, Chernossolos, Planossolos, Espodosolos	217,94	9,56%
4	Cambissolos	35,62	1,56%
5	Neossolos, Vertissolos, Organossolos, Gleissolos, Plintossolos, Afloramentos rochosos, Solo de Mangue	167,84	7,36%
	Total	2.280,87	100,00%

AUTOR: Leonardo Gonsalves Bergo
 SRC: UTM - SIRGAS 2000 / ZONE 24S
 FONTES: Ross (1994)
 IBGE (2022)
 INEMA (2004)
 EMBRAPA (1999)
 PRODUZIDO: NOV/2023

Figura 12 – Mapa de fragilidade ambiental para o critério pedologia.

A média aritmética das notas atribuídas pelos especialistas consultados foi utilizada para preencher a matriz de comparação pareada. A partir destes valores, o peso de importância para cada critério em avaliação foi estabelecido, sendo observados na Tabela 11.

Foi observado que os especialistas, em geral, atribuíram como fatores mais relevantes para a fragilidade ambiental os critérios de declividade e erosividade das chuvas, recebendo as maiores notas durante a pesquisa de opinião, obtendo pesos estatísticos correspondentes à 49,07 e 23,59%, respectivamente. Em contrapartida, os especialistas consideraram os critérios de uso e ocupação do solo e pedologia como os de menor relevância na composição da fragilidade ambiental, em que os pesos calculados foram de 9,05 e 5,52%, respectivamente (Tabela 11).

Tabela 11 – Matriz de comparação pareada, preenchida pela média aritmética das notas atribuídas pelos especialistas, sendo: DV – Declividade; ER – Erosividade das chuvas; DR – Dissecação do relevo; US – Uso e ocupação do solo; PD – Pedologia; PI – Peso de importância.

Matriz de comparação pareada e pesos de importância estabelecidos							
Critério	DV	ER	DR	US	PD	PI (w)	%
DV	1	4,25	4,25	5,5	5,25	0,4907	49,07
ER	0,2353	1	2,875	4,25	4	0,2359	23,59
DR	0,2353	0,3478	1	2,5	2,5	0,1277	12,77
US	0,1818	0,2353	0,4	1	3,125	0,0905	9,05
PD	0,1905	0,25	0,4	0,32	1	0,0552	5,52
Total	1,8429	6,0831	8,925	13,57	15,875	1	100

Fonte: Organizado pelo autor.

Estabelecidos os pesos de importância para cada critério, foram verificados os indicadores de consistência para a opinião dos especialistas (Tabela 12). Os indicadores representam a confiabilidade e a coerência das opiniões técnico-científicas, desempenhando um papel mediador no processo de atribuição de pesos. A avaliação da consistência é fundamental para assegurar que as opiniões dos especialistas sejam robustas e consistentes, garantindo assim a qualidade e a precisão dos pesos atribuídos a cada critério. A matriz ponderada com os indicadores de consistência pode ser observada na Tabela 12.

Tabela 12 – Matriz de comparação ponderada com os indicadores de consistência para os pesos de importância, sendo: w – Autovetor ou peso de importância; Aw - Produto matricial; n – Tamanho da amostra; IC – Índice de Consistência; IR – Índice Randômico de Saaty; RC – Razão de Consistência.

Matriz ponderada e indicadores de consistência												
Critério	DV	ER	DR	US	PD	w	Aw	λ Max	n	IC	IR	RC
DV	0,5426	0,6987	0,4762	0,4053	0,3307	0,4907	2,82					
ER	0,1277	0,1644	0,3221	0,3132	0,2520	0,2359	1,32					
DR	0,1277	0,0572	0,1120	0,1842	0,1575	0,1277	0,69	5,409	5	0,10	1,12	0,0914
US	0,0987	0,0387	0,0448	0,0737	0,1969	0,0905	0,46					
PD	0,1034	0,0411	0,0448	0,0236	0,0630	0,0552	0,29					

Fonte: Organizado pelo autor.

Observa-se que a Razão de Consistência (RC) obtida está abaixo dos 10% estipulados por Saaty (1980), enquadrando os resultados como confiáveis. O valor obtido, de 9,14%, indica que houve relativa dissonância entre as opiniões de alguns especialistas, mas embora que a RC sugira uma leve discrepância nas respostas, este valor ainda se mantém abaixo do limite aceitável, reforçando a coerência geral das opiniões e a solidez do processo de atribuição de pesos.

O Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado (MFP) para o município de Porto Seguro foi gerado através da atribuição dos pesos de importância obtidos a partir do processo hierárquico analítico aos critérios de fragilidade em análise. Assim, como foram classificados os graus de intensidade de fragilidade para cada critério, o MFP foi hierarquizado conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Classificação das intensidades do Mapa Fragilidade Ambiental Ponderado para a área de estudo.

Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado			
Graus de Fragilidade	Escala	Área (km ²)	%
Muito fraco	1	0	0
Fraco	2	298,76	13,19
Médio	3	1.502,00	66,33
Forte	4	402,24	17,76
Muito forte	5	61,45	2,71
Total		2.264,45	100

Fonte: Organizado pelo autor.

Foi observada a predominância da intensidade média de fragilidade ambiental para a área estudada, abrangendo 1502 km² ou 66,33% do total. A segunda classificação predominante foi a intensidade forte, que corresponde à 17,76% do total,

seguido pela intensidade fraca, que se estende por 13,19% do município de Porto Seguro. A intensidade muito forte de fragilidade ambiental correspondeu apenas à 61,45 km² de área, sendo a menor observada. Essas áreas, somadas, correspondem à 99,06% da extensão territorial do município de Porto Seguro.

Ao analisar a intensidade fraca de fragilidade ambiental, notou-se que sua presença foi abundante nos locais onde a vegetação está mais conservada, principalmente nas matas ciliares e na cobertura das Unidades de Conservação que estão inseridos no município de Porto Seguro. Esse dado é justificado pela ação protetora da vegetação, que atua como um importante amortecedor contra os processos erosivos.

As áreas com fragilidade mediana estão inseridas em locais mais planos e menos dissecados, entretanto, por conta da distribuição uniforme da fragilidade ambiental causada pela erosividade das chuvas, essas áreas ainda apresentam potencial risco aos processos erosivos, somadas também pela ampla distribuição das áreas convertidas em pastagem, agricultura ou silvicultura. O critério pedológico, apesar de apresentar um índice de fragilidade muito fraco em praticamente toda a área de estudo, contribuiu pouco para o resultado final, pois apresentou o peso de importância menos relevante (5,52%) no momento de ponderação dos critérios.

As áreas classificadas com o índice de fragilidade ambiental forte e muito forte, juntas, correspondem à aproximadamente 20% do município de Porto Seguro, ou seja, um quinto da área de estudo está potencialmente vulnerável à ação dos processos erosivos. Essas áreas se encontram em locais declivosos, principalmente nos vales mais dissecados e nos canais de drenagem que formam os afluentes dos principais rios do município. A declividade apresentou o maior peso de importância quanto à fragilidade total, logo, as áreas mais declivosas contribuíram em maior peso com os índices mais intensos de fragilidade.

O Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado pode ser observado na Figura 13.

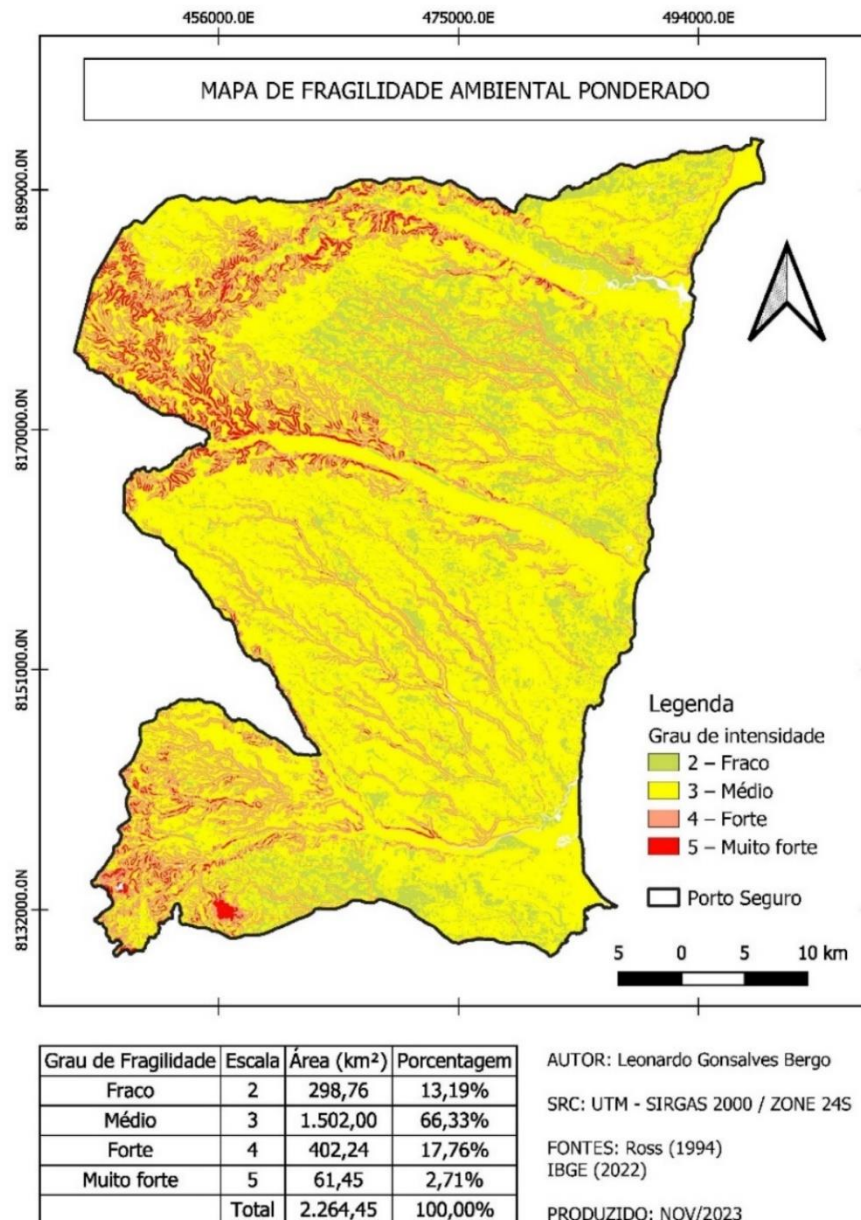


Figura 13 – Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado.

Em seu estudo, Gimenes e Filho (2013) elaboraram o mapa de fragilidade ambiental para uma área circundante à uma passagem de oleoduto no estado de São Paulo, onde os autores, utilizando o processo hierárquico analítico, também atribuíram o maior peso de importância à declividade, com um índice de 52%. O tipo de solo também apresentou baixa importância, com 14%.

Lourenço (2023), ao identificar as áreas de fragilidade ambiental para a zona urbana do município de Pilar/AL, obteve resultados similares com o presente trabalho, onde o referido autor, valendo da mesma metodologia, atribuiu o peso estatístico de 47,5% para a declividade e 10% para o critério pedologia. O trabalho do referido autor

também correlacionou os maiores índices de fragilidade ambiental para sua área de estudo com a declividade (Figura 13).

Fonseca; Cirolini e Bruch (2023) ao aplicar o processo hierárquico analítico na análise da sub-bacia hidrográfica do rio Rolante, no estado do Rio Grande do Sul, encontraram pesos de importância também similares aos atribuídos no presente trabalho, como 10% para o critério uso e ocupação do solo e 8% para o critério pedologia. Os resultados para declividade foram pouco destoantes, em que os autores atribuíram o peso estatístico de 69%, mas da mesma forma, ainda foi o critério mais relevante na composição do mapa de fragilidade ambiental.

O Mapa de Fragilidade Ambiental pela Média Aritmética (MFMA) foi elaborado considerando a possibilidade de que todos os critérios em avaliação possuem o mesmo potencial de desencadear processos erosivos em um determinado ambiente (Figura 14). Embora essa metodologia proporcione uma visão geral simplificada, facilitando a interpretação e a comunicação dos resultados, é essencial reconhecer que essa abordagem pode subestimar a influência de determinados fatores mais relevantes na dinâmica erosiva.

Em ambientes onde certos critérios desempenham um papel mais significativo na suscetibilidade à erosão, a média aritmética pode não capturar adequadamente as variações e nuances físico-ambientais, comprometendo a precisão da representação da fragilidade ambiental em determinadas áreas. No contexto específico da declividade, um parâmetro fundamental para a suscetibilidade à erosão, a média aritmética pode subestimar sua influência, dada a sua importância na aceleração do escoamento superficial e transporte de sedimentos. Ambientes com declividades mais acentuadas podem apresentar uma vulnerabilidade significativamente maior à erosão, e a equalização proporcionada pela média aritmética pode não refletir com precisão essa disparidade.

Ao avaliar os resultados obtidos no MFMA, observou-se um incremento na área classificada como intensidade média de fragilidade, passando dos 66,33% encontrados no MFP para 74,16%. Também foi observado um leve incremento na área classificada como intensidade fraca, com um aumento percentual de aproximadamente 5 pontos. Por outro lado, as áreas de fragilidade forte e muito forte foram drasticamente reduzidas, em que somadas, não ultrapassam os 8% de cobertura, muito diferente dos 20% encontrados no MFP.

O Mapa de Fragilidade Ambiental pela Média Aritmética está ilustrado na Figura 14.

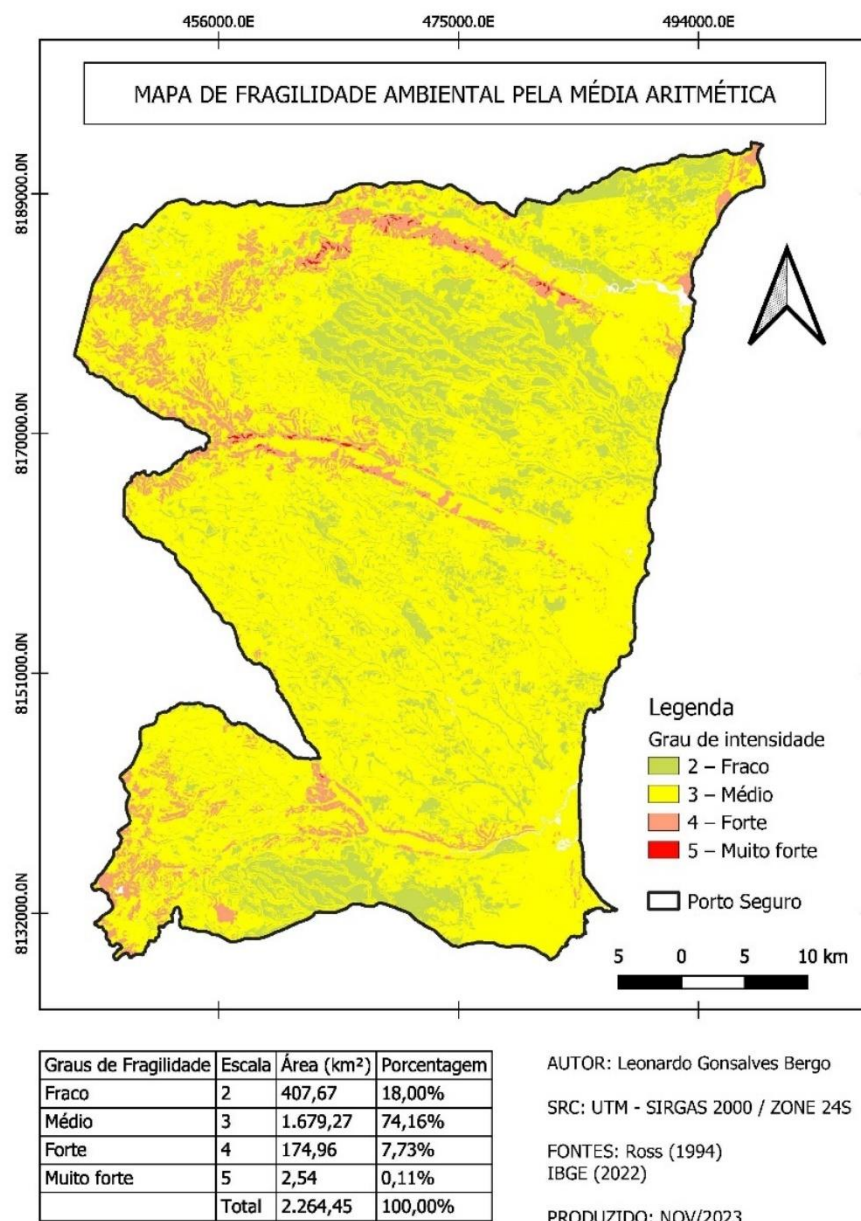


Figura 14 – Mapa de Fragilidade Ambiental pela Média Aritmética.

Entende-se que essa diferença foi possível pela maior consideração dos critérios de dissecação do relevo, uso e ocupação do solo e pedologia no cálculo do produto final, critérios que foram muito menos relevantes após a atribuição de pesos de importância. O mapa de dissecação do relevo é composto majoritariamente de áreas com índice fraco de fragilidade ambiental, e os locais que possuem maior fragilidade coincidem os do critério declividade.

O mapa de uso e ocupação do solo continua servindo como métrica para indicar as áreas que possuem vegetação em bom estado de conservação, ou áreas antropizadas que estão mais vulneráveis aos processos erosivos. As áreas mais ecologicamente conservadas ainda estão bem delimitadas no MFMA, entretanto, os locais classificados com médio grau de intensidade sobrepõem-se as áreas mais declivosas, podendo subestimar a real fragilidade desse ambiente.

Da mesma forma, é possível inferir que o mapa de fragilidade ambiental para o critério pedologia também pode mascarar o real potencial de perda de solo em pontos específicos do mapa, pelo fato do referido mapa possuir cobertura praticamente integral da intensidade muito fraca, graças à estabilidade proporcionada pelos Latossolos.

5. CONCLUSÃO

A fragilidade ambiental para o município de Porto Seguro foi caracterizada com sucesso, onde as metodologias para a obtenção dos critérios de fragilidade e a metodologia de atribuição de pesos de importância se mostraram eficientes.

O método de atribuição de pesos pelo processo hierárquico analítico se mostrou adequado, relacionado e comparando os diferentes fatores causadores da fragilidade ambiental. A pesquisa de opinião foi aprovada pelos testes de consistência, sendo efetivamente utilizada como suporte à decisão para definir os critérios mais impactantes na somatória do produto final.

O Mapa de Fragilidade Ambiental Ponderado e o Mapa de Fragilidade Ambiental pela Média Aritmética identificaram a predominância de uma intensidade média de fragilidade para o município de Porto Seguro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BECKER, B. K.; EGLER, C. A. G. **Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico-econômico pelos estados da Amazônia legal**. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Secretaria de Coordenação da Amazônia, 1997, 40p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8 ed. Ícone editora, São Paulo, 2012, 360 p.

BOLLELI, T.; SANTOS, B.; SANCHES, R.; MOREIRA, R.; BOURSCHEIDT, V.; SOUZA, P. H. de; MAUAD, F. Análise espaço-temporal e extrema da erosividade da chuva na região centro-leste do Estado de São Paulo, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 43, 2023.

CANDIDO, H. G. **Degradação ambiental da bacia hidrográfica do rio Uberaba – MG**. Jaboticabal-SP: UNESP, 2008, 96p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Jaboticabal.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; FILHO, P. H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. INPE, São José dos Campos, 2001, 103p.

CUNHA, C. M. L.; MENDES, I. A.; SANCHEZ, M. C. A cartografia do relevo: uma análise comparativa de técnicas para a gestão ambiental. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 1, 2003.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. Distribuição espacial da erosão potencial e atual do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, MG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 677-685, 2016.

FERNANDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. O.; SCHMIDT, M. A. R.; PEREIRA, C. E. Análise multicritério com uso da AHP para avaliação temporal na vulnerabilidade ambiental: estudo de caso na bacia hidrográfica do Uberabinha, MG. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 8, n. 3, p. 141-158, 2019.

FONSECA, E. H.; CIROLINI, A.; BRUCH, A. F. Método de análise hierárquica de processos (AHP) aplicado a fragilidade ambiental da sub-bacia hidrográfica rolante, Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 17, n. 1, 18p, 2023.

FRANÇA, L. C. de J.; MUCIDA, D. P.; DE MORAIS, M. S.; CATUZZO, H.; ABEGÃO, J. L. R.; PEREIRA, I. M. Zoneamento da fragilidade ambiental de ecossistemas naturais e antropizados por meio de avaliação multicritério. **Nativa**, v. 7, n. 5, p. 589–599, 2019.

FRANCO, G. B.; BETIM, L. S.; MARQUES, E. A. G.; GOMES, R. L.; CHAGAS, C. S. Relação qualidade da água e fragilidade ambiental da Bacia do Rio Almada, Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, 114-127p, 2012.

FREIRES, E. V. et al. A análise geossistêmica e a ecodinâmica nos estudos de vulnerabilidade. **CONSERVAÇÃO**, p. 80-89, 2022.

FREITAS, E. S. **Avaliação do uso do GPM (Global Precipitation Measurement) para determinação de eventos chuvosos e suas propriedades no Brasil: uma análise na escala subdiária**. João Pessoa-PB: UFPB, 2019, 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba.

GAIDA, W.; BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Correção atmosférica em sensoriamento remoto: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 01, p. 229-248, 2020.

GIMENES, F. B. Q.; FILHO, O. A. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). **ANAIS XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, v. 16, 2013, p. 6564-6571.

GOUVEIA, R. G. L. et al. Geoprocessamento em bacia hidrográfica em um curso de agronomia para identificação da declividade do terreno. **ANAIS XVI CONGRESSO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE**. 2022, p. 191-196.

GUERRA, A. T. **Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 8ª ed. IBGE, Rio de Janeiro, 1993, 446p.

GUIMARÃES, F. S.; CORDEIRO, C. M.; BUENO, G. T.; CARVALHO, V. L. M.; NERO, M. A. Uma proposta para automatização do Índice de dissecação do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Eds): **Handbuch der Klimatologie**. p. 1-44, 1936.

LIMA, L. J. **Estudo integrado da paisagem, geomorfologia e geotecnologias: proposta de automatização dos índices de dissecação do relevo**. Salvador-BA: UFBA, 2018, 46p. Dissertação (Graduação em Geografia) – Universidade Federal da Bahia.

LIMA, M. T. Vi.; OLIVEIRA, C. W.; MOURA-FÉ, M. M. Análise multicritério em geoprocessamento como contribuição ao estudo da vulnerabilidade à erosão no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 5, p. 3156-3172, 2021.

LIRA, K. C. S.; FRANCISCO, H. R.; FEIDEN, A. Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. **Sociedade & Natureza**, v. 34, 17p, 2022.

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

LOURENÇO, R. M. G. et al. **Identificação das áreas de fragilidade ambiental no núcleo urbano do município de Pilar, Alagoas**. Maceió-AL: UFAL, 2023, 77p. Dissertação (Graduação em Geografia) – Universidade Federal do Alagoas.

MARCOS, A. S. X.; RUBIRA, F. G.; PISANI, R. J. Mapeamento da Fragilidade Ambiental da Bacia do Ribeirão do Escalvado–MG. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros, Seção Três Lagoas**, p. 509-535, 2021.

MATOS, A. C. M. **Identificação da fragilidade ambiental potencial através de análise multicritérios e técnicas de geoprocessamento: município de Patos de Minas/MG**. Uberada-MG: UFTM, 2016, 106p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

MATOS, R. M. F.; PIRES, M. M. Indústria de Celulose, Desenvolvimento e Uso do Solo na Microrregião Porto Seguro, Bahia. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 65-81, 2020.

MILANEZI, C. H. S.; PEREIRA, J. G. Caracterização da Vulnerabilidade Ambiental na Microbacia Do Córrego Azul, Ivinhema–MS. **Geografia (Londrina)**, v. 25, n. 1, p. 43-63, 2016.

MORAIS, R. C. S.; SALES, M. C. L. Estimativa do potencial natural de erosão dos solos da bacia hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 84-105, 2017.

NASCIMENTO, N. S.; VIEIRA, E. M.; GONÇALVES, J. A. C.; CUNHA, G. DE P. Q. Estudo da vulnerabilidade ambiental em uma micro bacia hidrográfica empregando hierarquia nominal e operador local. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09 n. 03, p. 897-916, 2016.

OLIVEIRA, C. A. **Mapeamento da susceptibilidade à erosão na bacia hidrográfica do alto Rio de Contas, Bahia**. Salvador-BA: UFBA, 2019, 54 p. Monografia (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 3ª edição, FEALQ, Piracicaba, 2008, 592 p.

Projeto MapBiomias – Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em novembro de 2023 através do link: [<https://brasil.mapbiomas.org/>]

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do departamento de geografia**, v. 8, p. 63-74, 1994.

SAATY, T. L. **Decision making with the analytic hierarchy process**. International Journal of Services Sciences, Pittsburgh, USA, 2008, 282p.

SAATY, T. L. Some mathematical concepts of the analytic hierarchy process. **Behaviormetrika**, v. 18, n. 29, p. 1-9, 1991.

SAATY, T. L. **The analytic hierachy process**. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. EMBRAPA, 5ª. ed. Brasília, 2018, 356 p.

SANTOS, J. O.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental Urbana. **Revista da ANPEGE**, v. 8, n. 10, p. 127-144, 2012.

SANTOS, R. C.; GUERRA, A. J. T. Avaliação da erosão dos solos na bacia hidrográfica do rio Pequeno, Paraty-RJ. **GEOSABERES: Revista de Estudos Geoeducacionais**, v. 12, n. 1, p. 23-43, 2021.

SILVA, T. R. G. et al. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas em Alagoas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 208-225, 2023.

SOUZA, C. M.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. São Paulo-SP: USP, 2007, 185p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Universidade de São Paulo.

THORNTHWAITE, W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geographical Review. New York, USA, v.38, n.1, 1948, 77p.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. IBGE, Rio de Janeiro, 1977, 91 p.

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e ambiente**, v. 23, p. 295-308, 2016.

VEIGA, R. S.; SILVA, V. A. Uso, cobertura e ocupação da terra no município de Porto Seguro, BA: uma análise espaço temporal (1985-2016). **Caminhos da Geografia**, v.19, n. 65, 232-244p, 2018.

WEISS, R.; PIPPI, L. G. A. Análise multicritério na definição de vulnerabilidade ambiental. **Terr@ Plural**, v. 13, n. 3, p. 272–295, 2019