



Modelagem da Vulnerabilidade à Desertificação no Alto Sertão do Estado de Sergipe por Análise Multicriterial

André Pedro Maia Leite Garrido¹; Paulo Sérgio de Rezende Nascimento¹

✉ psrn.geologia@gmail.com

1. Universidade Federal de Sergipe.

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 01 de julho de 2024

Aceito em: 26 de março de 2025

Publicado em: 30 de abril de 2025

Resumo: A vulnerabilidade ambiental refere-se à exposição do meio ambiente a riscos, que podem decorrer de características intrínsecas ou extrínsecas. Um dos principais riscos ambientais iminentes nas regiões semiáridas do Brasil é o processo de desertificação. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo caracterizar a vulnerabilidade à desertificação no território do Alto Sertão de Sergipe em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). O procedimento técnico consistiu na integração pelo método Processo Analítico Hierárquico (AHP), de 5 critérios (pedologia, declividade, cobertura vegetal, pluviometria e densidade de drenagem), utilizados como indicadores para o monitoramento da desertificação. Os resultados obtidos, na região de estudo, denotam uma predominância de zonas com vulnerabilidade média (50,04%) e forte (43,6%) à desertificação, as áreas de vulnerabilidade muito baixa são inexistentes e as de baixa são inexpressivas (4,54%). Dessa forma, a área de estudo caracteriza-se como uma região altamente vulnerável à desertificação, demandando a implementação de políticas públicas estruturadas a fim de conter e mitigar esse processo de degradação ambiental, como por exemplo o incentivo à adoção de sistemas agroflorestais e ampliação das áreas de conservação permanente.

Palavras-chave: Degradação ambiental, Semiárido Sergipano, Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento.

Modeling Vulnerability to Desertification in the Alto Sertão of the State of Sergipe by Multicriterial Analysis

Abstract: Environmental vulnerability refers to the exposure of the environment to risks, which may result from intrinsic or extrinsic characteristics. One of the main imminent environmental risks in the semi-arid regions of Brazil is the desertification process. Therefore, this work aims to characterize the vulnerability to desertification in the territory of the Alto Sertão de Sergipe in a Geographic Information System (GIS) environment. The technical procedure consisted of the integration, using the Analytical Hierarchical Process (AHP) method, of 5 criteria (pedology, slope, vegetation cover, rainfall and drainage density), used as indicators for monitoring desertification. The results obtained, in the study region, denote a predominance of areas with medium (50.04%) and strong (43.6%) vulnerability to desertification, areas of very low vulnerability are non-existent and low ones are insignificant (4.54%). Thus, the study area is characterized as a region highly vulnerable to desertification, requiring the implementation of structured public policies in order to contain and mitigate this environmental degradation process, such as encouraging the adoption of agroforestry systems and expanding areas of permanent conservation.

Keywords: Environmental Degradation, Semiarid Sergipe, Remote Sensing, Geoprocessing.

Modelación de Vulnerabilidad a la Desertificación en el Alto Sertão del Estado de Sergipe Mediante Análisis Multicriterial

Resumen: La vulnerabilidad ambiental se refiere a la exposición del medio ambiente a riesgos, que pueden resultar de características intrínsecas o extrínsecas. Uno de los principales riesgos ambientales inminentes en las regiones semiáridas de Brasil es el proceso de desertificación. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo caracterizar la vulnerabilidad a la desertificación en el territorio del Alto Sertão de Sergipe en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG). El procedimiento técnico consistió en la integración, mediante el método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), de 5 criterios (pedología, pendiente, cobertura vegetal, precipitaciones y densidad de drenaje), utilizados como indicadores para el seguimiento de la desertificación. Los resultados obtenidos, en la región de estudio, denotan un predominio de áreas con vulnerabilidad media (50,04%) y fuerte (43,6%) a la desertificación, áreas de muy baja vulnerabilidad son inexistentes y las bajas son insignificantes (4,54%). Así, el área de estudio se caracteriza por ser una región altamente vulnerable a la desertificación, requiriendo la implementación de políticas públicas estructuradas para contener y mitigar este proceso de degradación ambiental, como fomentar la adopción de sistemas agroforestales y ampliar áreas de conservación permanente.

Palabras clave: Degradación Ambiental, Sergipe Semiárido, Teledetección, Geoprocusamiento.

INTRODUÇÃO

A desertificação é o processo de degradação do solo, resultando na redução ou perda da capacidade biológica e da complexidade produtiva de terras agrícolas em zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, devido aos processos naturais e/ou antrópicos, que tornam os ambientes mais frágeis (BRASIL, 2015). As baixas precipitações pluviométricas e as altas taxas de temperatura e evaporação são consideradas como as principais características intrínsecas desencadeadoras da desertificação, e o desmatamento da cobertura vegetal e a compactação do solo, como as extrínsecas.

A discussão internacional sobre a desertificação gerou diversas tentativas mundiais para listar os principais indicadores preponderantes para identificação e monitoramento deste processo de degradação do solo. Como por exemplo, tem-se o documento “Metodologia Unificada para la Evaluación y Monitoreo de la Desertificación en America Latina”. Este documento descreve a metodologia unificada com os indicadores da desertificação a partir de instrumentos teóricos (MATALLO JÚNIOR, 2001).

A erosão do solo é um processo que possui frequente ocorrência em ambientes de clima semiárido, acarretando a intensificação da degradação da biomassa e aceleração do processo de desertificação (ZWEIG *et al.*, 2018). A desertificação pode ocorrer de duas formas distintas, com a perda gradativa dos nutrientes do solo ou de maneira abrupta que ocorre pela perda da parcela superficial do solo após sua exposição aos processos erosivos intensos, com a formação de ravinas e voçorocas. Os solos das regiões semiáridas apresentam pouca espessura e alta suscetibilidade a processos erosivos, características estas que contribuem para a vulnerabilidade ambiental à desertificação, principalmente os que se encontram em regiões de altos declives (AMORIM *et al.*, 2001).

A perda da cobertura vegetal é um fator preponderante para a identificação de áreas desertificadas. Com a supressão vegetal o balanço térmico na superfície é alterado, ocorrendo o aumento

da refletividade da radiação solar, o que provoca um fluxo de cima para baixo do ar seco da troposfera para regiões mais próximas da superfície, dificultando a formação de nuvens e afetando o microclima da região. Em áreas carentes de cobertura vegetal, submetidas a manejos agropecuários inadequados são os principais focos de processos erosivos severos (GUERRA *et al.*, 2014).

Um dos principais processos que acarretam a desertificação é a salinização do solo, em decorrência das precipitações escassas e altos índices de evaporação, reduzindo a retenção de água no solo e aumentando a concentração de sais solúveis no solo (SAMPAIO; ARAÚJO; SAMPAIO, 2005). No Brasil, as áreas que expressam esta característica são as regiões de clima semiárido, que possuem um período de seca superior a 6 meses e médias pluviométricas de 800 mm anuais.

Em 2004, o Brasil elaborou O Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN-Brasil). Este programa representou um marco para políticas de desenvolvimento sustentável e combate à desertificação (BRASIL, 2007). Segundo Brasil (2004), 1488 municípios pertencentes ao Nordeste, Norte de Minas Gerais e Espírito Santo estão enquadrados nas Áreas Suscetíveis à Desertificação (ASD), totalizando cerca de 1.340.863 Km². Estas áreas foram delimitadas a partir do Índice de Aridez, elaborado por Thornthwaite em 1941, o qual é dado pela razão entre a precipitação e a evapotranspiração potencial (BRASIL, 2007).

O estado de Sergipe apresenta grande suscetibilidade à desertificação, pois uma grande parcela de seu território está delimitada como ASD, dentre elas se destaca o território do Alto Sertão de Sergipe, o qual é enquadrado como área em estado muito grave de desertificação (BRASIL, 2007). Além das características ambientais adversas, os índices sociais deste território são extremamente baixos, contemplando apenas cerca de 19% de cobertura de esgotamento sanitário, 44% de coleta de resíduos sólidos, os quais não são tratados e 37% de taxa de analfabetismo. Estas características contribuem para que Alto Sertão de Sergipe, dentre os territórios do estado, apresente o pior Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do Estado de Sergipe, em torno de 0,575 (SERGIPE, 2008).

Como exposto, a desertificação envolve diversos fatores biológicos, físicos e socioeconômicos, desta maneira, processos que executem a integração destas diversas variáveis, a partir de uma análise multicritério, se tornam imprescindíveis no estudo deste processo (FLORES *et al.*, 2002). Destaca-se o Processo de Análise Hierárquica (AHP), proposto por Saaty (1990), o qual possibilita avaliar a vulnerabilidade ambiental, como o processo de desertificação, a partir da integração de dados em Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Logo, este trabalho tem como objetivo caracterizar a vulnerabilidade à desertificação empregando o método AHP em ambiente SIG, no território do Alto Sertão de Sergipe, a partir dos critérios de precipitação, tipo de solo, declividade, densidade de drenagem e cobertura vegetal.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo é o território Alto Sertão de Sergipe, delimitado pelos paralelos 9° 32' e 10° 19' de latitude Sul e pelos meridianos 36° 57' e 38° 3' de longitude Oeste. É formado pelos municípios de Canindé de São Francisco, Gararu, Monte Alegre de Sergipe, Nossa Senhora da Glória, Nossa Senhora de Lourdes, Poço Redondo e Porto da Folha (Figura 1).

O território situa-se a Noroeste do Estado e se estende por uma área de aproximadamente 4.900 Km², ocupa 22,37% do estado (SERGIPE, 2008). Representa cerca de 7,2% da população, tornando este território o quinto maior em termos de população entre os oito territórios sergipanos.



Figura 1. Mapa de localização do Alto Sertão de Sergipe

Fonte: Os autores.

O território apresenta clima semiárido com amplitude térmica elevada, com temperaturas diurnas que podem ultrapassar 40°C e temperaturas noturnas, que chegam a 20°C, principalmente no inverno. A pluviometria segue uma dinâmica semelhante àquela presente nas regiões de clima mediterrâneo, onde a estação seca predomina por aproximadamente 9 meses do ano e o período de maiores concentrações de chuva corre entre os meses de setembro e dezembro, com médias que variam entre 400 e 700 mm.

Estas características climáticas propiciaram a formação de solos rasos, pedregosos e secos, que sustentam a principal cobertura vegetal da região, espécies herbáceas e arbóreas do Bioma da Caatinga (SERGIPE, 2008).

Procedimentos metodológicos

Os materiais utilizados para realização do estudo foram: (i) dados do Sensor ALOS PALSAR – Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 12,5 metros (EARTH DATA, 2012); (ii) imagens OLI/Landsat-8 de órbita 215 e ponto 067 de 2022 (USGS, 2020); (iii) dados vetoriais do Atlas de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe Secretaria (SEMAC, 2024); (iv) estimativa pluviométrica por meio do *Satélite Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) 3B43 v7, com resolução espacial de 0,25° x 0,25° (EARTH DATA, 2019); (v) programa de geoprocessamento QGIS-versão 3.34.4 (QGIS, 2024).

A metodologia teve como principal base os indicadores apresentados por Santibañez (1997) (Quadro 1). As escalas das bases cartográficas foram averiguadas em Silva (2003). Estes indicadores são os principais fatores impactantes no processo de desertificação, e foram empregados por diversos autores, com destaque para Nascimento et al. (2016), Leal et al. (2020) e Silva e Nascimento (2024).

Quadro 1- Representação cartográfica de cada indicador

Indicadores	Representação cartográfica	Escalas
Erosão	Declividade	1:25.000
	Densidade de drenagem	1:20.000
Tipo de solo	Mapa pedológico	1:500.000
Índice de vegetação NDVI	Cobertura vegetal	1:100.000
Índice de precipitação	Precipitação média (mm/ano)	1.000.000

Fonte: Os autores.

O mapa de declividade foi confeccionado a partir do MDE-PALSAR-ALOS que retificou os dados altimétricos e radiométricos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e *National Elevation Dataset* (NED) (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022). As classes de declividade foram obtidas a partir da classificação definida pela Embrapa (1999): 0 a 3%; 3 a 8%; 8 a 20%; 20 a 45% e 45 a 75%.

O mapa de cobertura do solo foi realizado pelo método *Normalized Difference Vegetation* (NDVI), desenvolvido por Kriegler *et al.* (1969), empregando as bandas espectrais 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo) do Landsat-8. O resultado desta álgebra de mapas gera um produto em que seus valores variam de -1 a 1, os valores negativos representam corpos hídricos, enquanto os valores próximos a zero representam solos expostos e estruturas de concreto, já os valores positivos representam vegetação, como plantações, gramíneas, arbustos e florestas, pois os valores que se aproximam de 1 representam vegetações densas e saudáveis (JONES; VAUGHAM, 2010; HUANG *et al.*, 2020). De acordo com o EOS (2020), a classificação dos índices de NDVI devem seguir os intervalos apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Classes de NDVI

Intervalos de NDVI	Classes de cobertura vegetativa
-1,0 a 0	Corpos hídricos
0 a 0,2	Solo exposto
0,2 a 0,4	Vegetação escassa
0,4 a 0,6	Vegetação moderada
0,6 a 1,0	Vegetação densa

Fonte: Adaptado de EOS (2020).

O mapa de densidade de drenagem, que representa a erodibilidade do solo dada pela dissecação do relevo, foi elaborado por meio da extração dos vértices dos arquivos vetoriais de hidrografia, ou seja, das drenagens fluviais. A partir dos vértices realizou-se o método de interpolação Kernel, com raio de ação de 3000 metros, como proposto por Santos, Nascimento e Barros (2020). A interpolação Kernel é uma técnica que gera uma função de probabilidade não paramétrica de uma variável qualquer, dessa maneira é possível obter resultados de densidade probabilística de ocorrência de determinado fator em uma área escolhida, inclusive da drenagem hidrográfica (SANTOS; NASCIMENTO; BARROS, 2020).

Desta forma, considerando que quanto maior a densidade de drenagem, menor é a infiltração da água no solo e, em contrapartida, maior é o escoamento superficial da água, que por sua vez representa a maior suscetibilidade a ocorrência de erosão hídrica.

O mapa de precipitação foi desenvolvido a partir dos dados matriciais pluviométricos disponibilizados pelo *software* Giovanni, que possuem resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (aproximadamente 25 km), considerada muito baixa. Dessa maneira, foi necessário realizar um tratamento destes dados com finalidade de confeccionar a carta de precipitação com resolução apropriada com base no tamanho da área de estudo. Baseando-se em Medeiros-Feitosa e Oliveira (2020), os pixels do arquivo matricial, que possuem valores atribuídos de precipitação, foram convertidos em pontos e interpolados pelo método *Inverse Distance Weighted* (IDW), com resolução de 30mx30m.

Este método utiliza os valores específicos, como precipitação anual, de cada ponto de entrada e por meio destes são estimados os valores em outros locais adjacentes em uma área delimitada. O peso do valor característico destes locais adjacentes é calculado pelo inverso de suas distâncias em relação aos pontos de entrada (BEZERRA NETO; NASCIMENTO; BARROS, 2022).

No âmbito dos SIG é possível realizar a integração de distintas variáveis por meio da álgebra de mapas, entretanto, nos casos de integração de variáveis que apresentam naturezas diferentes, torna-se necessário uma reclassificação dos valores em uma escala de grandeza estipulada, esse método é necessário pois os parâmetros que possuem valores brutos maiores, em suas respectivas naturezas,

seriam mais preponderantes para o resultado (SAMPAIO, 2012; BEZERRA NETO; NASCIMENTO; BARROS, 2022).

O processo de reclassificação dos mapas temáticos (Tabela 1) foi baseado na metodologia proposta por Ross (1992), o qual estipulou o grau de fragilidade dos ambientes naturais e antropizados para cada critério em uma escala que varia de 1 a 5, onde considera-se os graus de vulnerabilidade como: 1 (Muito fraco); 2 (Fraco); 3 (Médio); 4 (Forte); 5 (Muito forte). Para a classificação dos tipos de solo, foi realizada uma adaptação das categorias de suscetibilidade dos solos ao processo de desertificação, proposto por Lima, Oliveira e Aquino (2002), ao modelo de Ross. Ainda, com relação à variável de precipitação utilizou-se a metodologia proposta por Figueirêdo e Calasans (2008) para classificação das médias anuais de precipitação quanto ao risco de salinização, adaptada também ao modelo de Ross.

Tabela 1. Classificação dos pesos das variáveis

Variáveis					Grau
Declividade (%)	Densidade de Drenagem	Cobertura vegetal (NDVI)	Tipo de solo	Precipitação (mm/ano)	
-	-	Água	-	-	0
0 - 3	Muito Baixa	Vegetação densa	-	-	1
3 - 8	Baixa	-	-	-	2
8 - 20	Média	Vegetação escassa	Planossolos	-	3
20 - 45	Alta	-	Neossolos	600-800	4
>45	Muito Alta	Solo exposto	Luvissolo	400 -600	5

Fonte: Os autores.

A fim de definir a contribuição dos parâmetros analisados quanto a sua relevância para o desencadeamento de zonas desertificadas foi utilizado o método AHP. Esta metodologia é indicada para processos que exigem tomadas de decisões complexas, com o objetivo de comparar diferentes critérios para o desencadeamento de um fator em estudo. Para exercer esta comparação foi criada uma escala numérica para explicitar o quão determinado elemento é mais importante em relação a outro, que varia de 1 a 9, o valor 1 indica que as variáveis comparadas apresentam semelhança em grau de importância, enquanto o 9 representa grande importância de um fator em comparação com o outro (SAATY, 2008).

A comparação entre estes critérios ocorre por meio de uma matriz quadrada de comparação pareada (Tabela 2), na qual é determinada a relevância dos fatores alocados na coluna à esquerda da matriz em relação aos da linha do topo, os quais estão organizados na mesma sequência da coluna (SAATY, 1990). A hierarquia foi definida a partir das diferentes escalas dos mapas temáticos (critérios), de acordo com os princípios propostos por Nascimento (2004). Conforme estipulado pelo autor, os critérios que apresentam maiores escalas são mais representativos e preponderantes para modelagem multicritério por meio da álgebra de mapas.

Tabela 2. Matriz de comparação pareada

Critério	Declividade	Densidade de Drenagem	Cobertura vegetal	Tipo de solo	Precipitação	Pesos
Declividade	1,0000	0,5000	2,0000	4,0000	7,0000	0,2791
Densidade de Drenagem	2,0000	1,0000	4,0000	6,0000	9,0000	0,4235
Cobertura vegetal	0,5000	0,2500	1,0000	2,0000	5,0000	0,1684
Tipo de solo	0,2500	0,1667	0,5000	1,0000	3,0000	0,0946
Precipitação	0,1429	0,1111	0,2000	0,3333	1,0000	0,0344

Fonte: Os autores.

Após o estabelecimento do grau de importância relativa entre todos os parâmetros deve-se calcular o autovetor (W_i), autovalor máximo ($\lambda_{\max}$) e a razão de consistência. O autovetor é o peso que cada variável exerce de maneira global em relação a todas as outras na análise comparativa, logo o autovetor (W_i) é representado pela normalização da soma dos valores de cada linha da matriz. Posteriormente é necessário o cálculo do autovalor máximo a partir da equação 1:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[A]W_i}{W_i} \quad (1)$$

Onde: $\lambda_{\max}$ é o autovalor máximo, n é o número de parâmetros comparados, W_i é o autovetor de peso, $[A]$ é a matriz de comparação pareada e $[A]W_i$ é a matriz resultante da multiplicação do autovetor W_i e a matriz de comparação pareada. Dessa forma, a partir do resultado da matriz $[A]W_i$, foi possível calcular o autovalor máximo $\lambda_{\max}$ (Equação 2):

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[A]W_i}{W_i} = \frac{1}{5} \left(\frac{1,447}{0,279} + \frac{2,527}{0,424} + \frac{0,775}{0,168} + \frac{0,422}{0,095} + \frac{0,187}{0,034} \right) = 5,131 \quad (2)$$

De posse do autovalor máximo, calculou-se o índice de consistência (IC) da matriz de comparação pareada (Equação 3):

$$IC = \left(\frac{\lambda_{\max}}{n-1} \right) = \left(\frac{5,131-5}{5-1} \right) = 0,0327 \quad (3)$$

A razão de consistência (RC) é expressa pelo quociente entre índice de consistência (IC) e consistência aleatória média (CAM). Segundo Vargas (1982), a CAM (Tabela 3) foi determinada a partir da média dos índices de consistência de 500 matrizes recíprocas de mesma ordem, variando em uma determinada escala, cujas entradas possuíam a mesma probabilidade de ocorrência. Segundo Saaty

(1990), a RC deve ser menor que 0,10 para que os pesos atribuídos sejam coerentes, caso contrário é necessário fazer uma nova análise e comparação entre as variáveis.

Tabela 3. Valores de CAM para matrizes quadradas de ordem 3 a 9

3	4	5	6	7	8	9
0,54	0,88	1,10	1,25	1,33	1,42	1,45

Fonte: Adaptado de Vargas (1982).

Tabela 4. Valores dos pesos estatísticos dos critérios

Critério	Pesos estatísticos (W)
Declividade	0,279
Densidade de drenagem	0,424
Cobertura Vegetal	0,168
Tipo de solo	0,095
Precipitação	0,034

Fonte: Os autores.

Por meio do método AHP, foram obtidos o valor de 5,131 para $\lambda_{\max}$ e de 0,042 para razão de consistência. Dessa maneira, foi constatada a coerência da atribuição de pesos para os critérios, podendo assim, prosseguir com estes valores para a confecção do mapa de vulnerabilidade à desertificação no Alto Sertão de Sergipe, por meio da álgebra de mapas dos parâmetros definidos: tipo de solo (S), declividade (D), Densidade de drenagem (Dd), cobertura vegetal (V) e de precipitação (P). Dessa maneira, o cálculo é explicitado por meio da equação 5.

$$S.D. = (D * 0,279) + (Dd * 0,424) + (V * 0,168) + (S * 0,095) + (P * 0,034) \quad (5)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pedologia

Os principais tipos de solos do Alto Sertão de Sergipe (Figura 2) são os luvisolos, neossolos e planossolos. Os planossolos são muito suscetíveis à erosão laminar linear, desenvolvendo sulcos e ravinas pela ação combinada de antropismo e ao elevado gradiente textural que favorecem os processos erosivos. Os luvisolos são pouco profundos com pequeno grau de intemperização, cujos minerais primários facilmente intemperizáveis, possibilitam a ascensão de sais para os horizontes superiores, tornando-os suscetíveis à salinização e a erosão. Os neossolos são pouco desenvolvidos sem presença do horizonte B e sua constituição arenosa e friável facilita a desagregação, tendem a ser muito suscetíveis à erosão, mesmo quando ocorrem em relevo suave (SILVA, 2008). As áreas de cada classe de solo estão dispostas na Tabela 5.

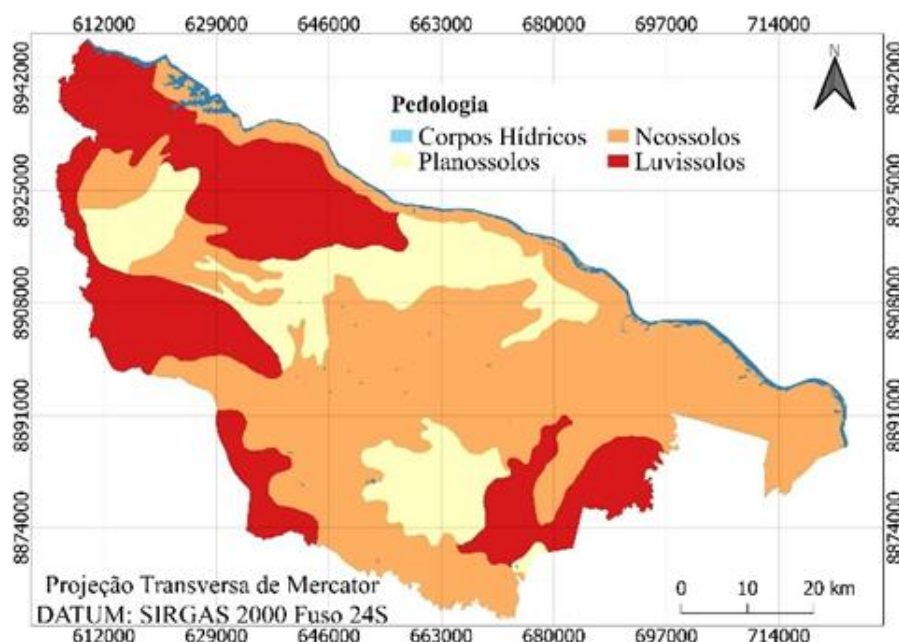


Figura 2. Mapa Pedológico do Alto Sertão de Sergipe

Fonte: Os Autores.

Os planossolos correspondem 18% da área de estudo (Tabela 5) e foram classificados como moderadamente suscetíveis à erosão. Nesta classe há a predominância de solos que apresentam declives de 3% a 20%, com permeabilidade moderada a lenta. Quando utilizados para agricultura podem sofrer erosões moderadas, inicialmente, mas que se agravam rapidamente com o mantimento do cultivo. Os neossolos, que representam cerca de 51%, são caracterizados com forte suscetibilidade a processos erosivos, devido à sua predominância em relevos ondulados (8 a 20%) a fortemente ondulados (20 a 45%). Os luvisolos representam 33% da área e são caracterizados como muito fortemente suscetíveis à erosão, os solos dessa classe predominam nas declividades acima de 29%, apresentam baixa permeabilidade e caso utilizados para agricultura, sofrem processos erosivos intensos em poucos anos (LIMA; OLIVEIRA; AQUINO, 2002; SILVA, 2009).

Tabela 5. Área das classes dos tipos de solo

Classes	Área (Km²)	Percentual (%)
Corpos hídricos	97,57	1,98
Planossolos	896,42	18,15
Neossolos	2520,88	51,03
Luvisolos	1424,69	28,84

Fonte: Os autores.

A predominância de solos rasos e pouco permeáveis são agravantes para o desencadeamento da desertificação. As regiões de planossolos são menos suscetíveis à desertificação, principalmente por sua incidência em regiões de baixas declividades, apesar de pouco espesso e permeabilidade lenta, as baixas inclinações atenuam os processos erosivos. A permeabilidade é uma das principais características do

Modelagem da Vulnerabilidade à Desertificação no Alto Sertão do Estado de Sergipe por Análise Multicriterial Cadastral

solo para a identificação de áreas vulneráveis aos processos de degradação do solo, pois quanto menor a capacidade de infiltração da água, maior é o escoamento superficial das águas de chuva e maior é a erosão.

Declividade

O aumento da declividade é um dos aspectos que aumentam a severidade da degradação e da perda do horizonte superficial dos solos. Segundo Amorim *et al.* (2001), quanto maior a declividade, maior o impacto das partículas de água no solo, e maior a movimentação dessas partículas, em consequência do aumento da velocidade do escoamento superficial.

Tricart (1977) foi o precursor da classificação dos ambientes em estáveis, nos quais os processos pedológicos prevalecem, e em instáveis, nos quais prevalecem os processos morfogenéticos. Em sua análise, os ambientes que apresentam altas declividades são propícios à morfogênese, como por exemplo deslizamentos de encostas e erosão. Observando a Figura 3 e tabela 6, nota-se a predominância dos processos morfogenéticos, devido a predominância de declividades entre 20 e 45%, representando cerca de 53% do território. Além disto, há uma tendência de declividades ainda maiores, acima de 45%, ao norte e leste da área de estudo, onde há uma suscetibilidade muito grave a processos morfogenéticos de degradação, como a erosão e consequentemente a desertificação.

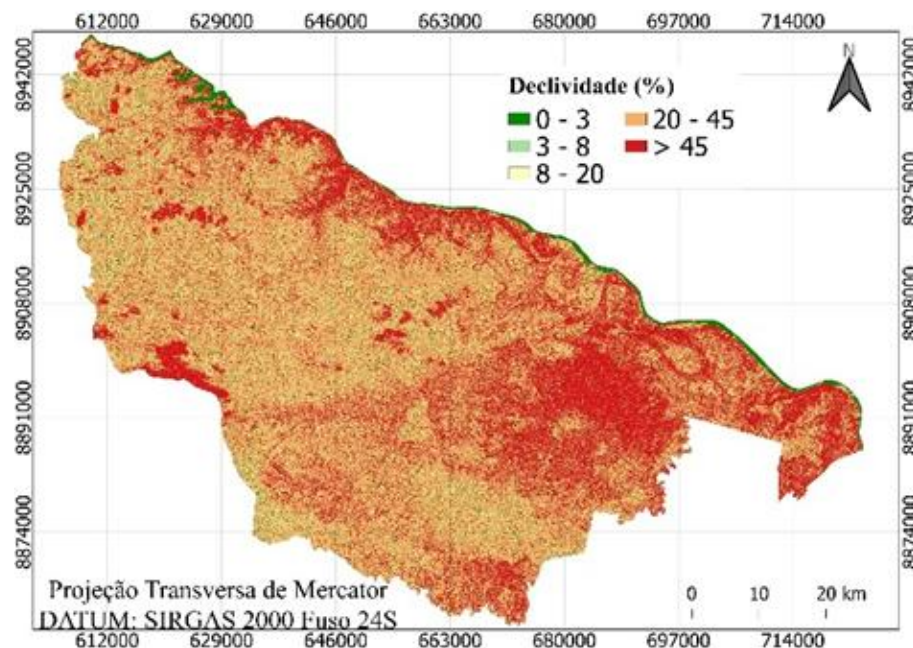


Figura 3. Mapa de declividade do Alto Sertão de Sergipe
Fonte: Os autores.

Tabela 6. Área das classes de declividade

Classes (%)	Área (Km²)	Percentual (%)
0 a 3	262,41	5,31
3 a 8	0,0703	0,0014
3 a 20	493,01	9,98
20 a 45	2640,34	53,45
> 45	1543,83	31,25

Fonte: Os autores.

As áreas que apresentam declividades abaixo de 20% são pouco expressivas, representando cerca de 15% do território, e se encontram principalmente na porção central e leste. De maneira geral, por conta destas características supracitadas, a região do Alto Sertão de Sergipe apresenta grande suscetibilidade a processos erosivos severos de forma predominante.

Vegetação

A vegetação do Alto Sertão de Sergipe é um reflexo das suas condições climáticas e pedológicas. Nesta região há uma predominância de espécies que apresentam características de uma flora caducifolia, além disto, o ambiente apresenta fase de caatinga hiperxerófila arbustiva de pequeno, médio e grande porte (BRITO, 2006). Estas características contribuem para a predominância de vegetação esparsa, com baixa densidade de fitomassa, compondo cerca de 86% da cobertura vegetal da região, enquanto a vegetação densa é muito pouco representativa, compondo apenas 0,8%.

As áreas de solo exposto se concentram majoritariamente adjacentes aos principais núcleos urbanos da área de estudo, representando 12% da área, (Figura 4 e Tabela 7). Esta cobertura vegetal foi convertida para cultivos e pastagens, além disso este bioma é continuamente explorado com a retirada de madeira para diversos usos pela população, como construção de casas, cercas e uso de lenha (BRITO, 2006). Estas áreas, que apresentam solo sem nenhuma cobertura vegetal, são altamente suscetíveis à desertificação.

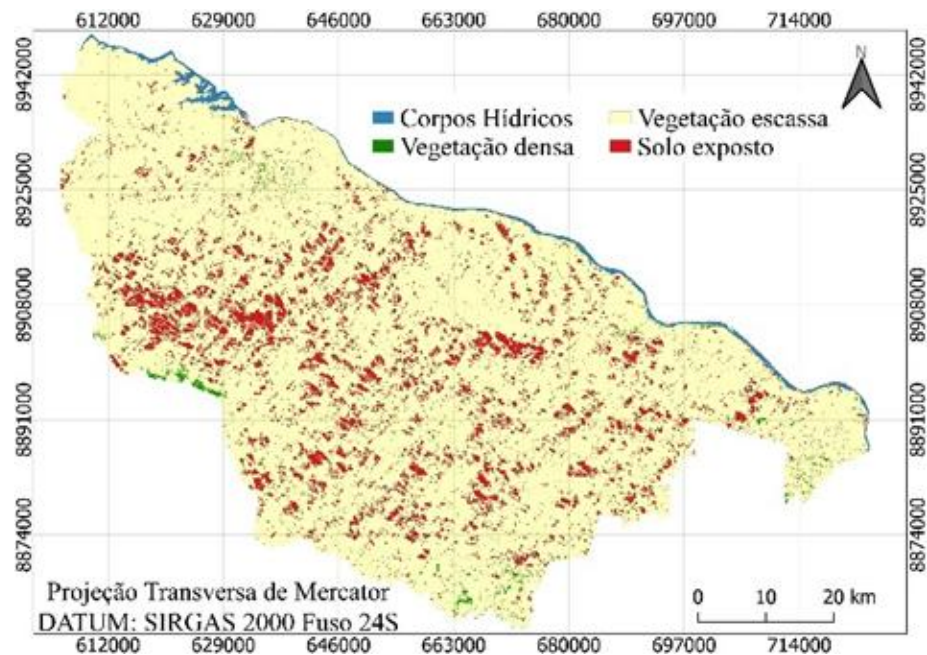


Figura 4. Mapa de cobertura vegetal do Alto Sertão de Sergipe
Fonte: Os autores (2024).

Tabela 7. Área das classes de cobertura vegetal

Classes	Área (Km²)	Percentual (%)
Corpos hídricos	68,39	1,38
Vegetação densa	40,14	0,81
Vegetação esparsa	4236,34	85,76
Solo exposto	594,69	12,04

Fonte: Os autores.

Precipitação

O Alto Sertão de Sergipe apresenta duas faixas de precipitação média anual, a primeira entre 600 e 800 mm, que corresponde a 23,93 da área e a segunda entre 400 e 600 mm, abrangendo 76,07% do território. A distribuição dos períodos chuvosos de forma irregular e os grandes períodos de seca são características da região, a qual apresenta o clima semiárido.

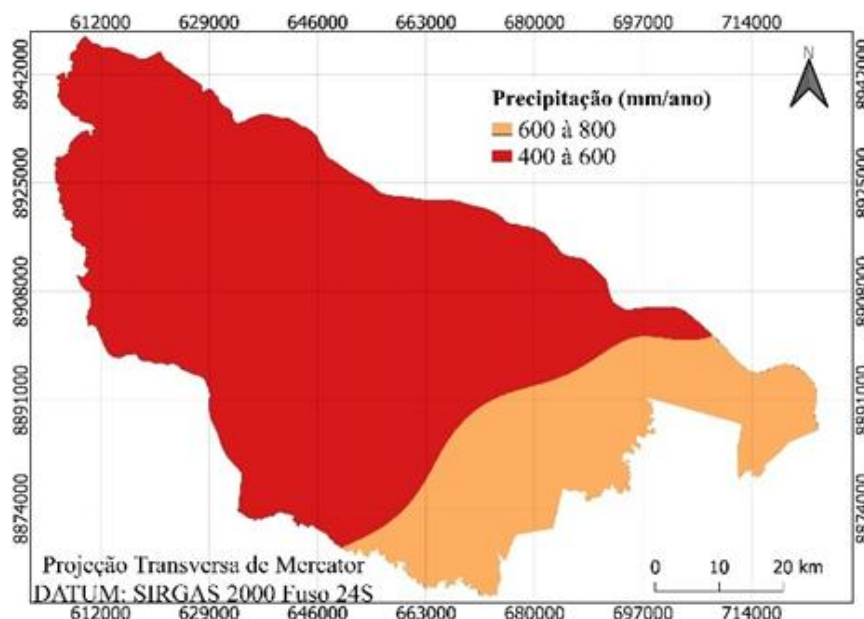


Figura 5. Mapa de Precipitação média anual do Alto Sertão de Sergipe
Fonte: Os autores.

Considerando que a evapotranspiração média do sertão sergipano gira em torno de 2100 mm/ano (SERGIPE, 2014), a região do Alto Sertão de Sergipe apresenta uma grande vulnerabilidade à salinização de seus solos, principalmente as áreas a leste, que apresentam precipitações mais baixas. As grandes concentrações de sódio no solo reduzem a concentração de eletrólitos do solo, o que acarreta uma maior dispersão das argilas presentes no solo e a elevação da viscosidade da água, fatores que contribuem para diminuição da permeabilidade do solo. As chuvas torrenciais, concentradas em um curto período do ano, contribuem para erosão e lixiviação dos solos da região, principalmente os que se encontram em altas declividades, afetando de forma negativa áreas férteis (BRITO, 2006).

Densidade de drenagem

As áreas com maiores densidades de drenagem estão diretamente correlacionadas ao potencial de erosão fluvial e pluvial, determinando uma superfície com elevados índices de dissecação, maiores vazões, além de acarretar um maior carreamento sedimentos, acarretando a lixiviação e a intemperização dos solos (CASTRO; CARVALHO, 2009). As maiores incidências de áreas que apresentam entre baixa e muito baixa capacidade de drenagem, ocorrem na porção centro-oeste, entretanto há um padrão de crescimento da densidade de drenagem na porção leste da área de estudo, onde se encontram as maiores declividades (Figura 6 e Tabela 8).

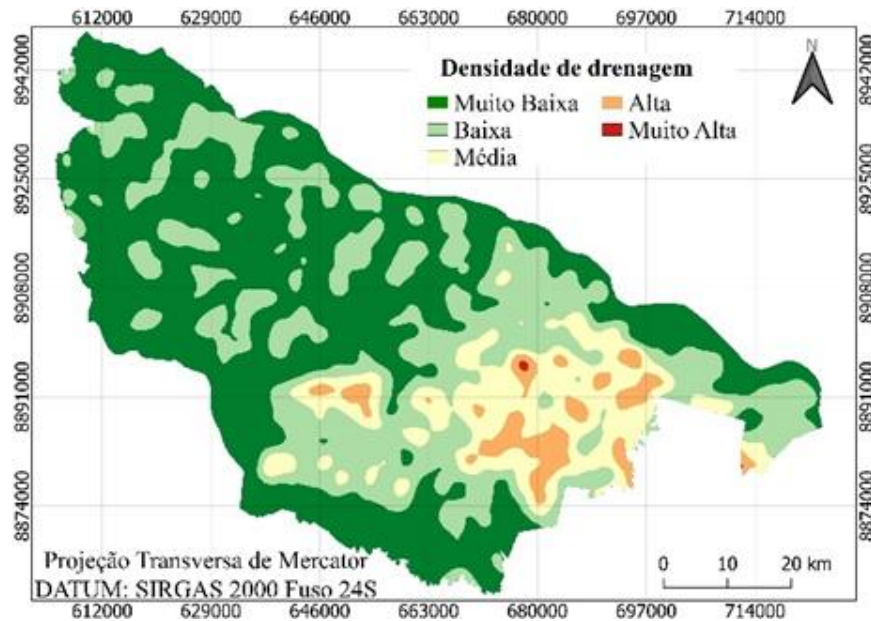


Figura 6. Mapa de densidade de drenagem do Alto Sertão de Sergipe

Fonte: Os autores.

Tabela 8. Áreas das classes de densidade de drenagem

Classes	Área (Km ²)	Percentual (%)
Muito Baixa	2518,38	50,98
Baixa	1619,91	32,79
Média	613,89	12,43
Alta	185,46	3,75
Muito Alta	1,92	0,039

Fonte: Os autores.

Segundo Santos e Nascimento (2019), as áreas de que apresentam maiores densidades de drenagem são constituídas por solos com baixa permeabilidade os quais favorecem o escoamento superficial nestas parcelas e por consequência processos erosivos laminar e ou linear. Grandes concentrações de escoamento laminar podem causar processos erosivos crescentes, onde inicialmente ocorre a formação de sulcos no horizonte superficial e com a persistência da degradação são formadas ravinas e, conseqüentemente, as voçorocas que representam o estágio mais danoso ao solo, impedindo o desenvolvimento sustentável da área afetada, inclusive os cultivos agrícolas.

Para a atenuação da erosão, lixiviação e assoreamento das áreas a leste, que detém maior densidade de drenagem, são recomendadas medidas de proteção por meio do reflorestamento e recomposição da mata ciliar dos principais cursos hídricos.

Vulnerabilidade à desertificação

Por meio da integração dos mapas de pedologia, declividade, cobertura vegetal, precipitação e densidade de drenagem foi possível confeccionar o mapa de vulnerabilidade à desertificação do Alto

Sertão de Sergipe, a partir da equação 5, que realiza a sobreposição das informações, através de uma operação aritmética simples (adição e multiplicação), envolvendo uma ponderação dos temas. O mapa gerado por esta operação foi classificado em 4 classes de vulnerabilidade à desertificação (Figura 7), a partir de quartis, que permite extrair informações do conjunto amostral e dividir os dados ordenados em ordem crescente em quatro partes iguais.

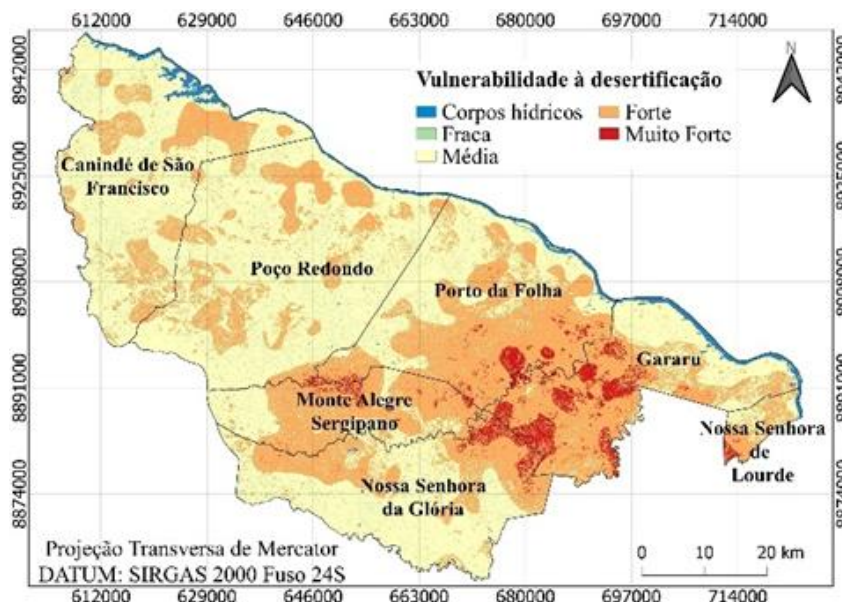


Figura 7. Mapa de vulnerabilidade à desertificação do Alto Sertão de Sergipe

Fonte: Os autores.

Após a integração, notou-se que o território não apresenta áreas de vulnerabilidade muito fraca à desertificação e a classe de fraca vulnerabilidade é muito pouco representativa, correspondendo a 2,46% da área total. Por outro lado, as áreas que apresentam média e forte vulnerabilidade abrangem 56,25% e 38,14% do território, respectivamente. As áreas que apresentam vulnerabilidade muito forte correspondem a 3,15% da extensão territorial e estão concentradas nos municípios de Gararu, Porto da Folha e Nossa Senhora da Glória. Estas áreas devem receber maior atenção, pois apresentam grandes declividades, alta densidade de drenagem e o solo mais suscetível a processos erosivos da região.

A partir dos resultados apresentados, sugere-se que sejam tomadas medidas mitigadoras, como proposta pelo Plano de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN - Brasil) (BRASIL, 2004): (i) redução da pobreza e da desigualdade; (ii) ampliação sustentável da capacidade produtiva; (iii) conservação, preservação e manejo sustentável dos recursos naturais; (iv) gestão democrática e fortalecimento institucional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em todas as análises, ficou evidente a superioridade do produto obtido por aerolevantamento, tanto em aspectos geométricos (identificação de alvos, precisão e acurácia) quanto radiométricos (distribuição de histogramas e classificação multiespectral).

Tendo em vista a utilização dos referidos mosaicos como fontes de dados para atualização de bases cadastrais, torna-se ineficaz a utilização do produto gerado a partir de imagens orbitais Worldview 2 e 3 para quaisquer tipos de atualização cartográfica em escalas de aquisição cadastrais (até 1:10.000). A utilização dos mosaicos de imagens orbitais, conforme disponibilizados para o Instituto Pereira Passos, acaba por degradar a qualidade das bases vetoriais originais, adquiridas na escala 1:2000 e PEC-PCD Classe A (BRASIL, 2016). Além disso, a incorreta identificação de alvos, devido a problemas tanto geométricos quanto radiométricos, pode levar a erros de classificação e distorções no mapeamento urbano. Apesar destas questões, pode-se considerar importante para estudos futuros a avaliação do indicador de qualidade de usabilidade das imagens utilizadas. Visto que a escala obtida, conforme o PEC-PCD foi de 1:25.000 na classe B, torna-se viável realizar estudos quanto a adequação ao uso, nas quais valor o erro foi de 12,5 m (considerando a referida escala), com RMS de 6,7 m. Um aspecto importante a ser comentado, também, é que tais resultados convergem com as pesquisas citadas na introdução. A importância destas imagens de satélite para fins de mapeamento traz à tona a escassez da existência de bases cartográficas em escala grande, conforme apontando por Silva e Camboim (2021), o mapeamento de referência em escalas de 1:25.000 no Brasil não supera 5% da extensão total do país.

Apesar das duas imagens possuírem a mesma resolução radiométrica, de 8 bits, as imagens obtidas por aerolevantamento permitiram conduzir o trabalho de atualização de bases cadastrais de forma mais eficaz, por apresentarem um histograma melhor distribuído (maior contraste), facilitando o trabalho de interpretação visual.

Apesar das ortoimagens possuírem melhor resolução espectral, com o acréscimo da banda do infravermelho próximo (NIR), comparada com as imagens WorldView, disponibilizadas para este estudo com apenas as bandas do intervalo do visível, os resultados da classificação usando o método Random Forest apresentaram problemas similares de identificação entre as classes: “solo exposto” e “edificações”; e “vias” e “edificações”. Esse fato, já esperado devido à semelhança em relação às características espectrais entre as referidas classes, pode ser explicado pela baixa diferenciação espectral no intervalo do infravermelho próximo (NIR) e a necessidade de acréscimo no número de amostras coletadas.

Ainda que a precisão posicional dos alvos a serem atualizados tenha sido degradada, passando da classificação inicial de PEC-PCD Classe A para PEC-PCD Classe B na escala 1:2000, o produto é satisfatório para uso em interregno de restituições fotogramétricas, permitindo acompanhamento das variações do território urbano, com boa temporalidade.

Apesar dos resultados, entende-se que as imagens Worldview podem chegar a melhores resultados que os obtidos com o produto fornecido à Prefeitura do Rio de Janeiro (BRITO *et al.*, 2020) por

se tratar de produto de entrada ofertado pelo satélite. Dessa forma, caso o aerolevanteamento para obtenção de ortoimagens se torne inviável em sua execução anual, sugere-se lançar mão de imagens de satélite de alta resolução sob as seguintes condições: 1) com melhor resolução radiométrica; 2) com pequena cobertura de nuvens; e 3) com correção geométrica por ortorretificação a partir de modelo digital de elevações de maior precisão. Tendo em vista a existência de modelo digital de terreno do município do Rio de Janeiro, obtido a partir de sensor LiDAR, tal possibilidade torna-se viável, de modo a melhorar sobremaneira a qualidade do produto orbital e alcançar resultados similares ao obtido por aerolevanteamento.

Diante das questões, além do treinamento de amostras para efetuar correções de distorções geométricas e radiométricas e a avaliação da acurácia posicional nas imagens utilizadas, demais indicadores de qualidade, desempenham papel fundamental no processo de avaliação das imagens, principalmente quando se trata de disponibilização de dados abertos, atualização cartográfica e integração de bases de dados oriundos de diferentes fontes. A atual era do *big data*, onde milhares de dados são disponibilizados diariamente em plataformas online, permite que estudos futuros concentrem esforços na Acurácia Temporal, onde a combinação de outros modelos permita a melhoria da qualidade final do produto avaliado e a realização de testes periódicos, com as quais viabiliza o manuseio e exploração de algoritmos para diferentes finalidades.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos pela cessão dos dados utilizados na execução dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.5, n.1, p.124-130, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/smdgcmJk00PQvTVww8LJfSP/>. Acessado em 20 jan 2024.

BEZERRA NETO, J. A.; NASCIMENTO, P. S. R.; BARROS, G. V. P. Análise hierárquica aplicada à erosão do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (SE). **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v.10, n.2, p.82-106. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/49367>. Acessado em 22 jan 2024.

BRASIL. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Brasília: MMA, 2007. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf000159542>. Acessado em 15 nov. 2023.

BRASIL. **Lei Nº 13.153, de 30 de julho de 2015**. Institui a Política Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca e seus instrumentos. Brasília: Presidente da República, 2016. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/113153.htm. Acessado em 10 jan. 2024.

BRASIL. **Programa de Ação em combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAN BRASIL**. Brasília: MMA, 2004, 242p.

Modelagem da Vulnerabilidade à Desertificação no Alto Sertão do Estado de Sergipe por Análise Multicriterial Cadastral

CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. Análise morfométrica e geomorfológica da bacia hidrográfica do rio Turvo - GO, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. **SCIENTIA PLENA**, v.5, n.2, p.1-7, 2009. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/623>. Acessado em 20 jan 2024.

EARTH DATA. **Giovanni**. [S. I., s. n.], 2019. Disponível em: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Acessado em 15 jan. 2024.

EARTH DATA. **Alaska Satellite Facility**. [S. I., s. n.], 2012. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Acessado em 15 jan. 2024.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

EOS. Earth Observing System. **NDVI FAQ**: tudo o que você precisa saber sobre o índice. [S. I., s. n.], 2020. Disponível em: <https://eos.com/pt/blog/ndvi-faq/>. Acessado em 12 jan. 2024.

FIGUEIRÊDO, A. F. R.; CALASANS, N. A. Risco de salinização dos solos da bacia hidrográfica do Rio Colônia - Sudeste da Bahia/Brasil. **Engevista**, v.10, n.1, p.15-26, 2008. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8820>. Acessado em 10 jan. 2024.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; ALEXANDRE, S. T. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v.37, n.1, p.81-91, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/>. Acessado em 10 jan 2024.

HUANG, S.; LINA, T.; HUPY, J. P.; WANG, Y.; SHAO, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of Forestry Research**, v.32, n.1, p.1-6, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/341782370>. Acessado em 15 dez 2023.

JONES, H. G.; VAUGHAN, R. A. **Remote sensing of vegetation**. Nova York: Oxford University Press, 2010. 255p.

KRIEGLER, F.J.; MALILA, W.A.; NALEPKA, R.F.; RICHARDSON, W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In: SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF THE ENVIRONMENT, 6., Michigan, 1969. **Anais**. Michigan, 1969.

LEAL, F. G.; AQUINO, J. T.; ARAÚJO, J. G.; BARBOSA, I. B Modelagem geoambiental da vulnerabilidade à desertificação em municípios do Agreste Pernambucano. **Revista GEAMA**, v. 6, n. 3, p. 40-53, 2020.

LIMA, A. A. C.; OLIVEIRA, F. N. S.; AQUINO, A. R. L. **Limitações do uso dos solos do Estado do Ceará por suscetibilidade à erosão**. Fortaleza: Embrapa, 2002. 19p.

MATALLO JUNIOR, H. **Indicadores de Desertificação**: histórico e perspectivas. Brasília: UNESCO, 2001. 80p.

MEDEIROS-FEITOSA, J. R.; OLIVEIRA, C. W. Estudo comparativo dos dados de precipitação do satélite TRMM e postos pluviométricos. **Revista Geográfica de América Central**. Heredia, Costa Rica, v.2, n.65, p.239-262, jul./dez. 2020. Disponível em: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-39. Acessado em 22 jan 2024.

NASCIMENTO, P. S. R. **Subsídio à gestão ambiental hidroviária: o empreendimento hídrico Santa Maria da Serra**. 2004. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

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

QGIS Development Core Team. **A Free and Open Source Geographic Information System**. [S. I., s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.qgis.org/en/site/>. Acessado em 02 jan. 2024.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v.8, n.1, p.63-74, 1994.



SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Science**, v.1, n.1, p.83-98, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228628807_Decision_making_with_the_Analytic_Hierarchy_Process. Acessado em 15 dez 2023.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v.48, p.9-26, 1990. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/03772217571>. Acessado em 15 dez 2023.

SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, Y. S. B. Impactos ambientais da agricultura no processo de desertificação no Brasil. **Revista de Geografia**, v.22, n.1, p.90-112, 2005. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/>. Acessado em 2 dez 2023.

SAMPAIO, T. V. M. Diretrizes e procedimentos metodológicos para a cartografia de síntese com atributos quantitativos via álgebra de mapas. **Boletim de Geografia**, v.30, n.1, p.121-131, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/314910677>. Acessado em 30 nov 2023.

SANTIBAÑEZ, F. **Metodología unificada para la evaluación y monitoreo de la desertificación en America Latina**. Santiago: FAO/PNUMA, 1997.

SANTOS, L. A. N.; NASCIMENTO, P. S. R.; BARROS, G. V. P. Processamento analítico hierárquico no mapeamento da fragilidade ambiental à erosão do solo. **Revista Brasileira de Geomática**, v.8, n.4, p. 275-298, 2020.

SEMAC. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas. **Atlas de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe**. Aracaju: SEMAC, 2024. Disponível em: <https://portais.semac.se.gov.br/portalrecursoshidricos/>. Acessado em 04 jan 2024.

SERGIPE. **Panorama energético de Sergipe**. Aracaju: SUDEN/SE, 2014.

SERGIPE. **Plano de desenvolvimento do território: Alto Sertão de Sergipe**. Aracaju: Secretaria de Estado de Planejamento, 2008.

SILVA, A. B. **Sistema de informações Geo-referenciadas**. Unicamp, Campinas, 2003. 235p.

SILVA, A. T. L.; NASCIMENTO, P. S. R. Caracterização da vulnerabilidade à desertificação por geotecnologias no sul do estado de Sergipe. **Scientia Plena**, v. 20, n. 8, p. 1-12, 2024.

SILVA, C. R. **Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, 264 p.

SILVA JÚNIOR, J. A.; SILVA JÚNIOR, U. J.; PACHECO, A. P.; SANTOS, A. G. A. Análise de acurácia para dados ALOS PALSAR e ASTER GDEM para o município de Recife. **Revista brasileira de Geomática**, v.10, n.2, p.117-139, 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/14969>. Acessado em 30 nov 2023.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. FIBGE/SUPREN. Rio de Janeiro, 1977. 97p.

USGS. United States Geological Survey. **Earth Explorer**. [S. l., s. n.], 2020. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov>. Acessado em 16 jan. 20.

VARGAS, L. G. Reciprocal matrices with random coefficients. **Mathematical Modeling**, v.3, p.69-81, 1982. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025582900136>. Acessado 1 dez 2023.

ZWEIG, R.; FILIN, S.; AVNI, Y.; SAGY, A.; MUSHKI, A. Land degradation and gully development in and environments deduced by mezzo- and micro-scale 3D quantifications - The Negev Highlands as a case study. **Journal of Arid Environments**, v.153, p.52-65, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322409584>. Acessado em 4 jan 2024.