
PANORAMA DA SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO DOS SOLOS EM MUNICÍPIOS DO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

Samuel Alves dos **SANTOS**

Doutorando junto ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás (UFG). E-mail: geografosamuelsantos@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4317-4022>

Antonio Marcos dos **SANTOS**

Docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental e do Colegiado de Geografia da Universidade de Pernambuco. E-mail: antonio.santos@upe.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5968-9880>

Histórico do Artigo:
Recebido
Junho de 2020
Aceito
Dezembro de 2021
Publicado
Dezembro de 2021

Resumo: Este artigo tem como objetivo analisar os estados de susceptibilidade à perda de solos nos municípios de Dormentes, Afrânio, Petrolina, Santa Maria da Boa Vista e Lagoa Grande, localizados no semiárido do estado de Pernambuco. Para realização do estudo, foram necessárias análises dos atributos: solo; relevo; erosividade; uso e cobertura das terras e geologia. Após análise dos atributos, os mesmos foram cruzados com auxílio das ferramentas de geoprocessamento para produção dos mapas de susceptibilidade natural e geral a erosão dos solos, abrangendo as últimas quatro décadas. Os resultados apontam que, em diferentes períodos os solos tornaram-se mais susceptíveis à erosão impulsionado pela redução das caatingas para implementação e crescimento da agricultura irrigada, produção de carvão vegetal e ampliação das áreas de pecuária extensiva. Problema que pode contribuir, cada vez mais, para os riscos à desertificação. O destaque foram os crescimentos gradativos das áreas com média a muito alta susceptibilidade à erosão. Os motivos são vários desde o crescimento das áreas irrigadas à redução da caatinga para implementação da pastagem, comercialização da lenha e produção do carvão vegetal.

Palavras-chave: Perda de solos; Degradação da cobertura vegetal; Geoprocessamento.

SITUATION OF SUSCEPTIBILITY TO SOIL EROSION IN MUNICIPALITIES IN THE SEMIARID REGION OF PERNAMBUCO

Revista Equador (UFPI), Vol. 10, Nº 3, Ano, 2021, p. 01 - 25

Home: <http://www.ojs.ufpi.br/index.php/equador>

ISSN 2317-3491

Abstract: This article aims to analyze the states of susceptibility to soil loss in the municipalities of Dormentes, Afrânio, Petrolina, Santa Maria da Boa Vista and Lagoa Grande, located in the semiarid region of the state of Pernambuco. To carry out the study, analyzes of the attributes were necessary: soil; relief; erosivity; land use and cover and geology. After analyzing the attributes, they were crossed with the aid of geoprocessing tools to produce maps of natural and general susceptibility to soil erosion, covering the last four decades. The results show that, in different periods, the soils became more susceptible to erosion, driven by the reduction of caatingas for the implementation and growth of irrigated agriculture, production of charcoal and expansion of extensive livestock areas. A problem that can increasingly contribute to desertification risks. The highlight was the gradual growth of areas with medium to very high susceptibility to erosion. The reasons are several, from the growth of irrigated areas to the reduction of the caatinga to the implementation of pasture, sale of firewood and production of charcoal.

Keywords: Soil loss; Degradation of vegetation cover; Geoprocessing.

SITUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN DEL SUELO EN MUNICIPIOS DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA DE PERNAMBUCO

Resumen: Este artículo tiene como objetivo analizar los estados de susceptibilidad a la pérdida de suelo en los municipios de Dormentes, Afrânio, Petrolina, Santa Maria da Boa Vista y Lagoa Grande, ubicados en la región semiárida del estado de Pernambuco. Para realizar el estudio fueron necesarios análisis de los atributos: suelo; alivio; erosividad; uso y cobertura del suelo y geología. Después de analizar los atributos, se cruzaron con la ayuda de herramientas de geoprosesamiento para producir mapas de susceptibilidad natural y general a la erosión del suelo, que abarcan las últimas cuatro décadas. Los resultados muestran que, en diferentes períodos, los suelos se volvieron más susceptibles a la erosión, impulsados por la reducción de caatingas para la implementación y crecimiento de la agricultura de regadío, producción de carbón vegetal y expansión de áreas ganaderas extensivas. Un problema que puede contribuir cada vez más a los riesgos de desertificación. Lo más destacado fue el crecimiento gradual de áreas con una susceptibilidad media a muy alta a la erosión. Las razones son diversas, desde el crecimiento de las áreas irrigadas hasta la reducción de la caatinga hasta la implantación de pastos, venta de leña y producción de carbón vegetal.

Palabras clave: Pérdida de suelo; Degradación de la cubierta vegetal; Geoprosesamiento.

INTRODUÇÃO

A publicação deste estudo é resultante da necessidade de entender a susceptibilidade à erosão dos solos e como este problema ambiental poderá contribuir para um eventual processo de desertificação em municípios da microrregião de Petrolina, semiárido do estado de Pernambuco. A desertificação é a degradação das terras localizadas nas zonas secas, como, por exemplo, as inseridas sobre as tipologias dos climas áridos, semiáridos e subúmidos secos, que resultam de diversos fatores (UNCCD, 1994).

Os principais agentes, que contribuem para o processo de desertificação, são as variações climáticas e as ações antrópicas (LIMA, 2009; SANTOS e SANTOS, 2019).

Segundo Salih, Ganawa e Elmahl (2017), o uso intensivo dos solos para atividades de monocultura, o superpastoreio, a salinização e o desmatamento são causas ligadas diretamente ao processo de desertificação.

O Nordeste brasileiro, onde está inserida uma grande área sobre o clima semiárido, é a região mais afetada pelo problema da desertificação. De acordo com Vasconcelos Sobrinho (1983), desde a década de 1980, seis locais se destacam por ocorrerem processos de degradação dos solos e da cobertura vegetal em estado avançados, jamais observados na região. Essas áreas estão localizadas nos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Bahia.

Ao discutir sobre desertificação, um dos parâmetros inseridos no eixo de degradação das terras é o processo erosivo. A perda de solos é a forma mais nociva de degradação estudada atualmente e, no Brasil, a erosão dos solos tem gerado uma série de desastres e redução da produção agrícola (LEPSCH, 2011; GUERRA e MENDONÇA, 2012).

As principais causas que originam e aceleram o processo erosivo são os desmatamentos, o uso e o manejo inadequado dos solos para a agricultura e pecuária, a distribuição das chuvas, a declividade do terreno, o comprimento e a forma das encostas e o tipo da cobertura vegetal (OZSOY *et al.*, 2012; TIWARI, RISSE & NEARING, 2019). À medida que os solos tornam-se desprotegidos, conseqüentemente, as chuvas incidem diretamente sobre a superfície do terreno, o que proporciona rapidez do processo erosivo (LEPSCH, 2011; GUERRA, 2012; GUERRA e MENDONÇA, 2012).

O material erodido pela chuva faz parte da camada mais fértil, sendo composta pelo húmus, nutriente dos vegetais e, a depender do manejo, conter fertilizantes (BERTONI e LOMBARDI, 1999). Nas áreas em avançados estágios de desertificação ou com altos graus de susceptibilidade são perceptíveis os desgastes dos solos e seu impacto no processo de produção agrícola nas comunidades assentadas sobre eles (D'ODORICO *et al.*, 2012).

Vários são os mecanismos teóricos e metodológicos voltados para o estudo da erosão dos solos. Segundo Amorim (2003), diversos modelos matemáticos vêm sendo criados desde a década de 1950 com a finalidade de calcular a perda do solo provocada pelo processo erosivo e avaliar os riscos ou susceptibilidades de erosão dos solos e suas conseqüências. Entre os modelos matemáticos destacam-se os determinísticos, os quais são estruturados em equações matemáticas com uso de variáveis que interagem entre si.

Nos modelos matemáticos de base determinística, o comportamento dos sistemas é apreendido por leis físicas-naturais e o resultado é modelado de forma exata a partir da matemática clássica em que as relações entre as variáveis dos modelos são exatamente

previsíveis e são aferidas por argumentações matemáticas lógicas (CHRISTOFOLETTI, 2013). Ou seja, os resultados são determinados a partir das condições iniciais de entrada dos valores aferidos em cada variável.

Diante do que foi apresentado, nota-se a importância de estudar os graus de susceptibilidade à perda de solo em regiões semiáridas onde o risco de desertificação é alto. Alia-se às citadas necessidades a disponibilidade de métodos e técnicas eficazes e rápidas de fácil adaptação às condições locais.

Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar os estados de susceptibilidade à perda de solo em cinco municípios da microrregião de Petrolina, estado de Pernambuco, nas últimas quatro décadas e seu possível papel em um eventual processo de desertificação local.

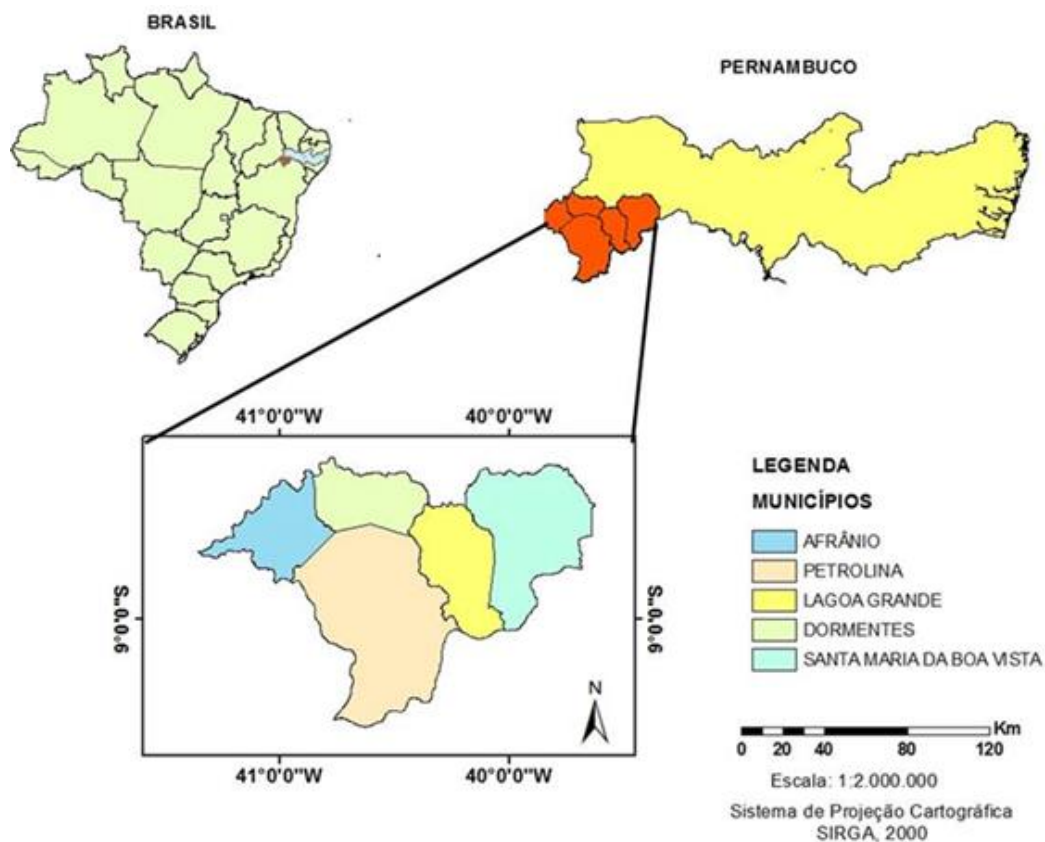
MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde aos municípios de Dormentes, Afrânio, Petrolina, Santa Maria da Boa Vista e Lagoa Grande, localizados na microrregião de Petrolina (figura 1). A microrregião possui uma área de 12.440,1km², cuja população total é de 390.660 habitantes em 2010 (IBGE, 2019). O clima da região é o semiárido com médias pluviométricas anuais de 431,8 mm. A estação chuvosa se inicia em dezembro com término em abril (BELTRÃO, *et al.*, 2005).

A vegetação predominante é do tipo Caatinga hiperxerófila com trechos de Floresta Caducifólia. A microrregião de Petrolina está inserida na Depressão Sertaneja, cujo relevo predominante é o suave-ondulado, cortada por vales estreitos, com vertentes dissecadas (BELTRÃO, *et al.*, 2005).

Figura 1 – Localização da microrregião de Petrolina (municípios de Dormentes, Afrânio, Petrolina, Santa Maria da Boa Vista e Lagoa Grande)



Fonte: Autores (2019).

Procedimentos metodológicos

O desenvolvimento deste estudo foi baseado nas propostas metodológicas de Crepani *et al.* (2001), Crepani *et al.* (2008), Pandey, Chowdary e Mal (2017) e Fernandez *et al.* (2018), pesquisas essas voltadas para mapeamento da susceptibilidade à erosão dos solos a partir de modelos matemáticos determinísticos.

O processo de cruzamento das informações, a construção dos mapas e a exportação dos dados de susceptibilidade à erosão dos solos ocorreram com subsídio dos instrumentos de geoprocessamento, tendo como suporte o *software* ARCGIS 9.3. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório do Grupo de Trabalho em Monitoramento Ambiental, Geotecnologia e Ensino (GTMAGEO) da Universidade de Pernambuco, *campus* Petrolina.

O mapa de susceptibilidade à erosão dos solos foi obtido a partir do cruzamento dos atributos ambientais: solo; relevo; erosividade; uso e cobertura das terras e geologia. O mapa de solos foi construído com base nos dados pedológicos disponíveis pelo Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE, 2006). As notas atribuídas às categorias dos solos

foram baseadas nas pesquisas bibliográficas de Crepani *et al.* (2001), Crepani *et al.* (2008) e Zaloti, Santos e Nascimento (2015). Os valores das notas estão descritos no quadro 1, as quais levaram em consideração a fragilidade da estrutura dos solos à erosão.

Para análise da estrutura do atributo geomorfológico (relevo), foi confeccionado um mapa com a declividade e altitude da área de estudo. A escolha dos intervalos das classes de declividade foi fundamentada na classificação de relevo da EMBRAPA (1979). A carta de declividade foi extraída por meio do processamento das imagens de radar *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), disponibilizada no Brasil por Miranda (2005). As notas para cada classe de relevo podem ser consultadas no quadro 1.

Quadro 1 - Notas e graus dos atributos ambientais empregados no mapeamento da susceptibilidade à erosão dos solos

Susceptibilidades	Notas	Atributos de análise					
		Solos	Relevo		Geologia (tipo de rocha)	Erosividade e	Uso da terra
			Declividade (%)	Tipologia			
Muito Baixo	1	Latossolos	0 – 3	Plano	Ígnea; metamórfica; Ígnea/metamórfica	2984,2 – 3298,8	
Baixa	2	Argissolos	3 – 8	Suave-ondulado	-----	3298,81 – 3305	Caatinga Densa
Média	3	Planossolos, Luvisolos e Vertissolo	8- 20	Ondulado	Metamórfica/ sedimentar ; Ígnea/ sedimentar	3305,1 - 3472,2	Caatinga Esparsa
Alta	4	Cambissolos	20 – 45	Forte-ondulado	-----	-----	Agricultura Irrigada
Muito Alta	5	Neossolos	>45	Montanhoso	Sedimentar	-----	Solo exposto

Fonte: Autores (2019).

O mapa de relevo foi subdividido em classes de declividade que representam as feições do relevo. A partir daí, as notas que representam menores riscos à erosão dos solos foram aferidas para as áreas planas, enquanto que as regiões mais elevadas receberam as notas que representam os maiores riscos à erosão.

O atributo erosividade é um fator que expressa a capacidade da chuva em erodir o solo e foi estimada a partir das equações 1 e 2 trabalhadas por Bertoni e Lombardi (1999) e Aquino, Oliveira e Sales (2006). Os dados pluviométricos utilizados foram disponibilizados pela EMBRAPA (2014) e pela ANA (Agência Nacional das Águas) coletados nos últimos

quarenta anos nas estações pluviométricas de Afrânio, Bebedouro, Petrolina e Santa Maria localizadas no estado de Pernambuco e a estação de Mandacaru no município de Juazeiro, estado da Bahia.

$$EI = 67,355 \left(\frac{r^2}{p} \right)^{0,85} \quad (1)$$

Em que: EI é a média mensal do índice de erosão, em MJ/ha.mm; r representa a precipitação média mensal, em mm e p a precipitação média anual, em mm.

Os índices de erosão mensal (EI) foram somados para a obtenção do índice de erosividade (R), em MJmm/h.ano, conforme a equação 2.

$$R = \sum EI \quad (2)$$

Quanto aos atributos geológicos foi empregada a base cartográfica em formato vetorial disponível pelo Serviço Geológico Brasileiro. Para a área de estudo foram identificadas quatro tipos de Rochas. Para cada tipo foi atribuída uma nota, a qual levou em consideração sua influência direta e indireta no potencial à erosão do solo (Quadro 1).

Em relação ao uso e à cobertura das terras foram empregadas imagens orbitais geradas pelo sensor MSS (Multispectral Scanner System) acoplado ao satélite LANDSAT 1 para o ano de 1973 e LANDSAT 2 para o ano de 1981 e também com imagens orbitais do sensor TM (Thematic Mapper) acoplado ao satélite LANDSAT 5 para os anos de: 1987; 1990; 1996; 2001; 2008 e 2011. Já para o ano de 2015, foi utilizada uma imagem gerada pelo sensor OLI (Operational Land Imager) acoplado ao satélite LANDSAT 8. Ambas as imagens estão sobre a órbita/ponto 217 e 218/66 dos referidos satélites.

As imagens foram registradas (ajuste no georreferenciamento) e, em seguida, submetidas ao processo de classificação supervisionada. Este processo consiste na escolha de classe de uso da terra por parte do pesquisador. Selecionaram-se quatro classes de uso, cada uma representada por 100 conjunto de pixels. Para cada classe, foi atribuída uma nota conforme seu grau de susceptibilidade à erosão conforme o quadro 1.

Após o processo de seleção dos usos, a imagem foi submetida ao processo de classificação supervisionada pelo método MAXVER, um dos mais populares classificadores onde o pesquisador escolhe e atribui classes aos pixels. Segundo Previdelli (2004), quanto

maior o número de pixel selecionado, mais precisa a classificação e, conseqüentemente, o mapeamento.

Os mapeamentos dos atributos foram cruzados por meio da álgebra de mapas, isso para a confecção da carta de susceptibilidade natural à erosão (equação 3) e as cartas de susceptibilidade natural à erosão geral dos solos (equação 4) por meio das técnicas de geoprocessamento.

$$SNEs = \frac{P + G + E + GE}{4} \quad (3)$$

Em que: *SNEs* é a susceptibilidade natural à erosão do solo; *P* é a susceptibilidade para o atributo pedologia; *G* é a susceptibilidade para o atributo geomorfologia; *E* é a susceptibilidade para o atributo erosividade e *GE* é a susceptibilidade para o atributo geologia.

$$SgEs = \frac{P + G + E + UT + GE}{5} \quad (4)$$

Em que: *UT* é a susceptibilidade para o atributo uso da terra.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

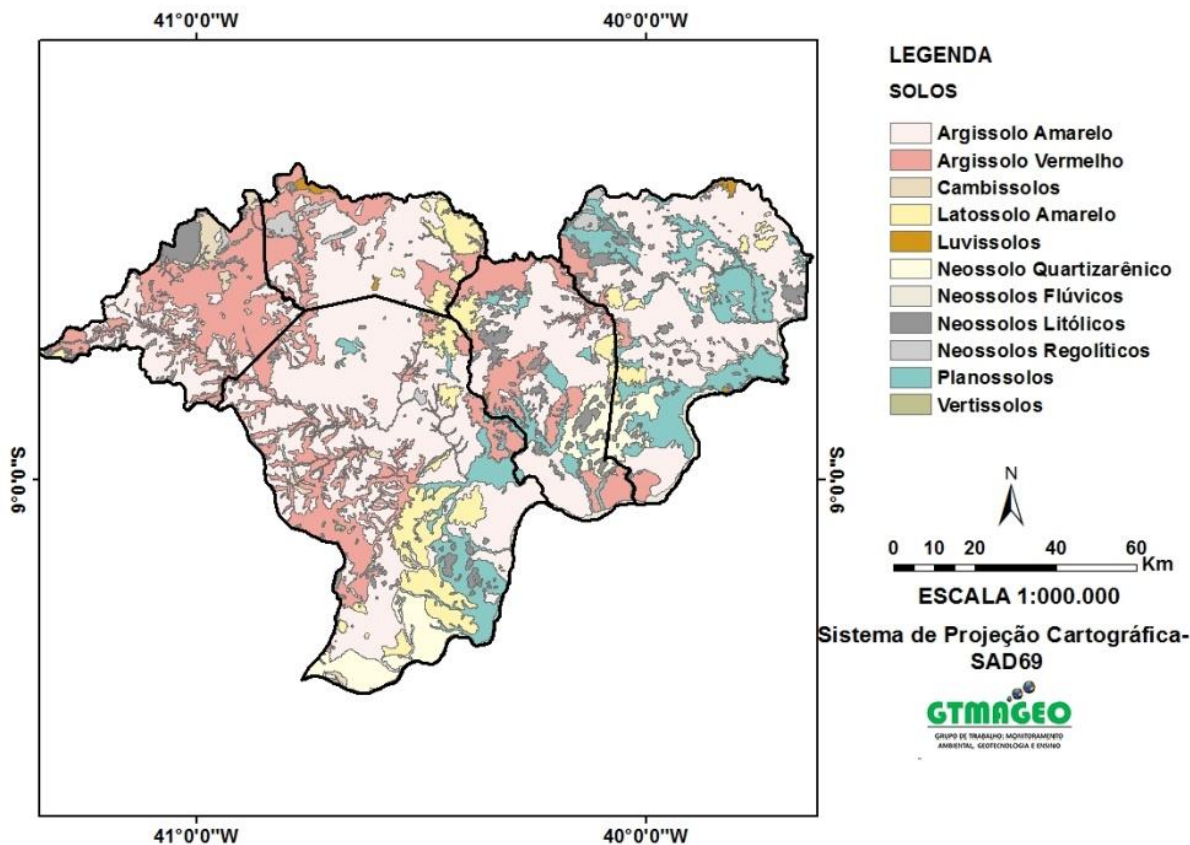
Susceptibilidades dos solos à erosão

Na distribuição dos solos na microrregião de Petrolina (figura 2), a classe predominante é dos Argissolos subdivididos em amarelos e vermelhos. São solos que apresentam quantidade significativa de argila concentrada no horizonte Bt (B-textural), sendo bem desenvolvidos, profundos a muito profundos (MOTA e VALLADARES, 2011; EMBRAPA, 2014). Na região de estudo, observa-se que os Argissolos contêm pedregosidade (SILVA, SILVA, BARROS, 2008). Quanto a sua distribuição, os Argissolos Vermelhos predominam no município de Afrânio, já os Argissolos Amarelos estão presentes em maior quantidade no território de Petrolina. Os Argissolos possuem alta concentração de argila no horizonte B em comparação com o horizonte superficial, sendo assim, está entre os solos mais desenvolvidos da área de estudo.

Os Planossolos estão presentes nos municípios de Petrolina (sudeste), Lagoa Grande (centro sul) e ocupam uma área maior em Santa Maria da Boa Vista. Possuem argila em alta atividade no horizonte B e são bastante resistentes à infiltração da água. São solos rasos a poucos profundos, mal drenados ou imperfeitamente drenados (CREPANI *et al.*, 2001; SILVA, SILVA, BARROS, 2008; EMBRAPA, 2006; MOTA & VALLADARES, 2011).

Devido às características encontradas para esses solos sua susceptibilidade à erosão é considerada média (figura 2).

Figura 2 - Distribuição dos solos na área de estudo



Fonte: Autores (2019)

Os Neossolos Quartzarênicos apresentam drenagem excessiva e são profundos a muito profundos. São solos arenosos com mais de 70% de areia formadas por grão de quartzo (SILVA, SILVA e BARROS, 2008). Tais solos estão presentes em áreas dos municípios de Petrolina e Lagoa Grande. Os Neossolos Regolíticos são encontrados nos municípios de Afrânio, Dormentes, Petrolina e Santa Maria da Boa Vista em pequenas quantidades. São quase que semelhantes aos Quartzarênicos, porém, possuem maiores quantidades de minerais primários facilmente intemperizáveis. Ambos são solos considerados de muita alta susceptibilidade à erosão por serem de textura arenosa a média, características que facilitam o processo de deslocamento de partículas.

Os Neossolos Flúvicos ocorrem nas bordas sul do mapa (figura 2), estão próximos às águas do rio São Francisco, os quais são formados por sedimentos fluviais depositados pelo canal fluvial. Já os Neossolos Litólicos estão presentes nos cinco municípios, em maior quantidade no município de Afrânio. Para Silva, Silva, Barros, (2008) esses solos são bastante

pedregosos, rasos e presentes em relevo bastante movimentado, características essas que facilitam sua remoção.

Por suas características, os Neossolos Litólicos e Flúvicos enquadram-se como solos de muito alta susceptibilidade à erosão. Visto que, em seu conjunto, apresentam ora baixa profundidade (Litólicos), ou uma profundidade elevada (Flúvicos), porém com alto risco de erosão devido ao baixo agregamento de suas partículas.

Os Latossolos Amarelos são solos porosos, bem drenados e profundos, não possuem pedregosidade, apresentam textura que varia entre média a muito argilosa, possuem equilíbrio entre a retenção de água e a drenagem (CREPANI *et al.*, 2001; SILVA, SILVA, BARROS, 2008; EMBRAPA, 2006; MOTA e VALLADARES, 2011). Por isso, são enquadrados como de muito baixa susceptibilidade à erosão. Estão concentrados em uma área maior em Petrolina e em porções menores nos municípios de Dormentes, Santa Maria da Boa Vista e Lagoa Grande.

Os Vertissolos estão presentes em pequenas manchas, pouco visíveis, nas áreas dos municípios de Petrolina, Dormentes, Santa Maria da Boa Vista e Afrânio. São solos com alto teor de argila expansiva do tipo 2:1, o que proporciona alto processo de expansão e contração, ciclos de umedecimento e secagem.

Esses solos são pouco permeáveis, o que dificulta o manejo. Outro fator encontrado nos Vertissolos é que, quando secos, são extremamente duros e, quando úmidos, não apresentam deslocamento em grande quantidade de partículas devido à média presença de argila (SILVA, SILVA e BARROS, 2008; EMBRAPA, 2006). Nesse contexto, os Vertissolos são classificados como de média susceptibilidade para erosão.

Os Cambissolos são solos constituídos por materiais minerais e com horizonte B pouco desenvolvido e abaixo de qualquer horizonte superficial (EMBRAPA, 2006). Em comparação com os Nossosolos Quartzarênicos e Regolíticos os Cambissolos, possuem teores de argila pouco maior, o que os enquadram como solos de alta susceptibilidade à erosão e não de muito alta. Na área de estudo, eles são encontrados em pequenos locais em todos os municípios.

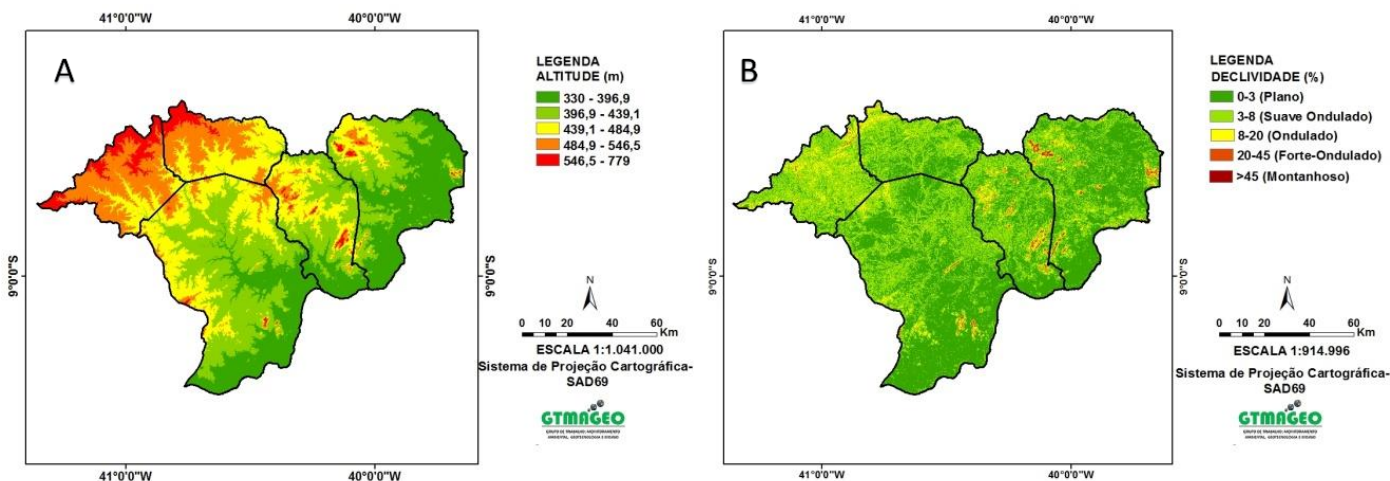
Contribuição da estrutura do relevo à erosão dos solos

Os mapas das figuras 3A e 3B apresentam a estrutura do relevo da área de estudo (tipologia, altimetria e declividade do terreno). O relevo plano, com declividade entre 0 a 3%, predomina na região de estudo, com destaque para os municípios de Petrolina, Lagoa Grande,

Dormentes e Santa Maria da Boa Vista. A altitude, em toda área de estudo, varia entre 330 a 439,1 m.

Nesses locais, o grau de suscetibilidade à erosão é considerado muito baixo, visto que, em terrenos planos, em decorrência da ausência de inclinação, o escoamento das águas são reduzidos. Com isso, o transporte de sedimentos é o mínimo possível, em comparação com áreas com maiores declividades.

Figura 3 - (A) Altimetria do relevo da área de estudo e (B) Declividade e tipologia do terreno



Fonte: Autores (2019).

O relevo suave ondulado está presente em todos os municípios, tem maior abrangência no município de Petrolina, Dormentes e Lagoa Grande, apresentando declividade entre 3 a 8 % com altitude que varia de 396,9 a 439,1 m. Nesse contexto, o grau de suscetibilidade à erosão dos solos sobre o domínio dessa estrutura de relevo é baixa. O enquadramento do relevo suave ondulado como de baixa susceptibilidade à erosão leva em consideração que os mesmos possuem declividades maiores que os planos.

O relevo ondulado predomina em Afrânio. Esta estrutura apresenta declividade, que varia de 8 a 20% com altitudes na área de estudo, variando de 439,1 a 484,9 m e apresenta média susceptibilidade à erosão.

O relevo forte ondulado é perceptível em pequenos pontos (Figura 3b), os quais fazem parte morros testemunhos e *Inselberg* com altitudes que chegam a 779 m. O enquadramento para esse tipo de relevo é de alta susceptibilidade à erosão, visto que, são estruturas que permitem a intensificação dos escoamentos em comparação com os demais tipos de relevos discutidos anteriormente. Não foi possível identificar na área de estudo relevo montanhoso.

Observa-se que a declividade determina os graus de susceptibilidade à erosão. Quanto mais plano o relevo menor o trabalho dos processos e das dinâmicas associadas ao

escoamento das águas no deslocamento de sedimentos e, conseqüentemente, menor a susceptibilidade à erosão.

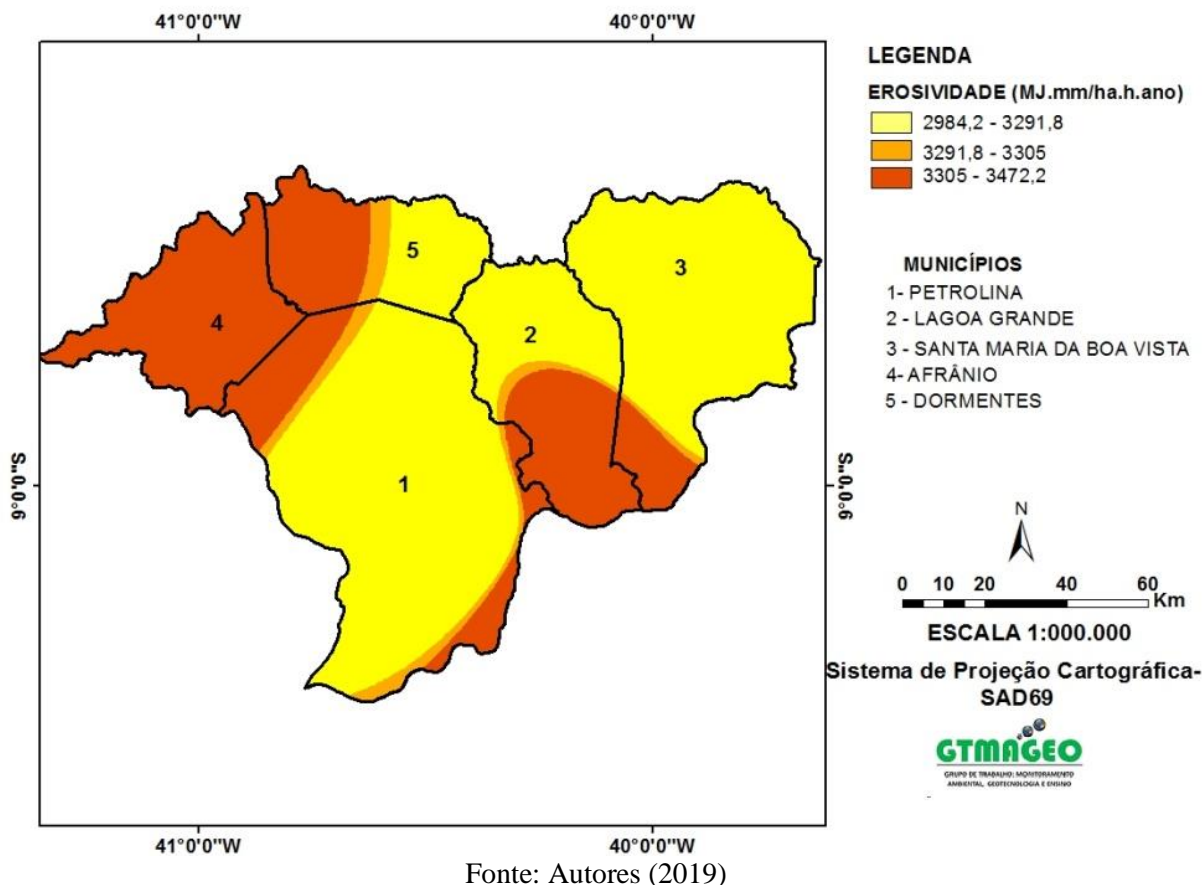
A erosividade e seu papel nas susceptibilidades dos solos à erosão

O mapa da figura 4 apresenta três classes de erosividade, as quais variam entre muito baixa a média suscetibilidade à erosão. Mais de 50% da área de estudo possui erosividade, variando entre 2984,2 a 3298,8 MJmm/ha.ano. Esses valores foram os mais baixos encontrados e estão atrelados a dominância dos reduzidos índices pluviométricos da região. Intervalo de valores considerado como de muito baixo potencial a susceptibilidade à erosão, compara-se a outros estudos realizados no território nacional a exemplo de Crepani *et al.*, (2001).

A segunda classe varia de 3298,81 a 3305 MJmm/ha.ano (baixa susceptibilidade) atinge no máximo 10% da região investigada, enquanto o restante da área de estudo apresenta erosividade, que varia entre 3305,1 a 3472,2 MJmm/ha.ano (média susceptibilidade).

Vale destacar que a erosividade tem ligação direta com os volumes de chuvas, quanto maior a precipitação pluviométrica, maior o potencial de erosão das chuvas. Nas áreas onde o potencial de erosividade são médios e baixos o fator elevação do relevo, no oeste da região de estudo, e os registros de chuvas, com volumes maiores, registrados nas estações pluviométricas do estado da Bahia influenciaram a erosividade nesses ambientes.

Figura 4 - Erosividade da área de estudo



Papel do uso e cobertura das terras na susceptibilidade à erosão

As figuras 5 e 6 apresentam a dinâmica de uso e cobertura das terras em diferentes anos nos cinco municípios selecionados para o presente estudo. Para o ano de 1973, observa-se que predominam as áreas com caatinga densa (fechada) seguida da caatinga esparsa (aberta) no município de Lagoa Grande, as quais representam baixa e média susceptibilidade à erosão, respectivamente (figura 5). Já as áreas com solo exposto ocupam 2,6% da área de estudo, e a agricultura irrigada 0,3%.

O predomínio da caatinga densa está correlacionada a dois fatores: reduzido desmatamento no ano de 1973 e as chuvas que ocorreram meses anteriores à obtenção da imagem de satélite que gerou o mapeamento. As chuvas sobre as caatingas proporcionam, em curto espaço de tempo, aumento do quantitativo de folhas e, conseqüentemente reduz as áreas onde, até então, predominavam as caatingas esparsas.

No ano de 1981, são perceptíveis mudanças em comparação a 1973 na organização e estrutura de uso das terras (figura 5). As áreas sobre caatinga densa continuam a predominar sobre as demais, (86%) da área total (figura 6). O restante da área é ocupada pela caatinga esparsa com 9% e pelo solo exposto, que apresenta um percentual de 4,4% (figura 6).

Para o terceiro ano, 1987, ainda há grandes áreas com predomínio da caatinga densa seguida pela caatinga esparsa. É visível na figura 5, nas margens do rio São Francisco, pequenas áreas classificadas como agricultura irrigada concentradas nos perímetros irrigados dos municípios de Petrolina, Lagoa Grande e Santa Maria da Boa Vista. A agricultura irrigada, no ano de 1987, ocupou 1,8% da área de estudo (figura 6), o que representa para essa classe de uso alta susceptibilidade à erosão. Já as áreas sobre solo exposto, em 1987 correspondem a 5,4%, valor 1% maior que no ano de 1981.

Para o ano de 1990, observa-se que o solo exposto concentra-se nas proximidades dos perímetros irrigados e nos municípios de Afrânio e Dormentes, corresponde a 9% da área estudada. A caatinga densa ocupa 47,6%, a esparsa 36,4% e a agricultura irrigada foi mapeada em 7% na área de estudo (figura 6).

No mapa de uso da terra do ano de 1996 (figura 5 e 6), as áreas sobre caatinga densa ocupam 58%, caatinga esparsa 26%, agricultura irrigada 8,9% e o restante 7,1% ocupado pelo solo exposto (figura 6). Em comparação com anos anteriores, novas áreas destinadas à agricultura irrigada surgem no município de Santa Maria da Boa Vista.

No início do século, ano de 2001, as caatingas predominam em 83% da área total estudada, verifica-se que a caatinga densa se destaca em relação à esparsa. É notório o crescimento da agricultura irrigada, a qual passa a ocupar 12,3% (figura 6). A classe solo exposto apresentou queda em comparação a 1996, redução que é justificada pela presença de chuvas meses anteriores à aquisição da imagem, que gerou o mapeamento de 2001.

No ano de 2008, a agricultura irrigada avança na expansão da sua área de representatividade, enquanto que houve pequenas reduções das áreas com predominância das caatingas (figura 5). O solo exposto volta a crescer e atinge 4,2%.

Em 2011, o destaque em todos os municípios da microrregião é o solo exposto, o qual passa a predominar em 11,1% da área de estudo (figura 6). A agricultura irrigada também apresenta expansão, porém em valores menores em comparação ao ano de 2001.

O ano final de análise é 2015 (figura 5). Nesse período, as áreas sobre a caatinga densa representam 46,3% e a caatinga esparsa 22,4%, totaliza-se 68,79% (figura 6). O solo exposto aumenta e atinge 13,2% e a agricultura irrigada ocupa 18% das terras da microrregião.

Observa-se uma mudança considerável na estrutura dos usos e ocupações das terras ao longo das quartas décadas. Neste contexto, as mudanças na dinâmica de uso das terras ao longo desse período expuseram os solos às erosões devido à ampliação das áreas irrigadas e a expansão das áreas sem cobertura vegetal. Áreas com maiores susceptibilidades à erosão dos solos, quando refere-se ao uso das terras, estão concentradas ao noroeste, sul e sudeste da área

de estudo, com destaque nos municípios de Afrânio e Dormentes. Municípios que apresentam grandes áreas sobre solo exposto proporcionadas pela expansão da pastagem destinada a criação de animais e produção do carvão vegetal. Inclui, também, os perímetros irrigados no sul e de Petrolina e Lagoa Grande e leste, nordeste e sul de Santa Maria da Boa Vista.

Figura 5 - Evolução do uso e cobertura das terras na área de estudo entre os anos de 1973 a 2015.

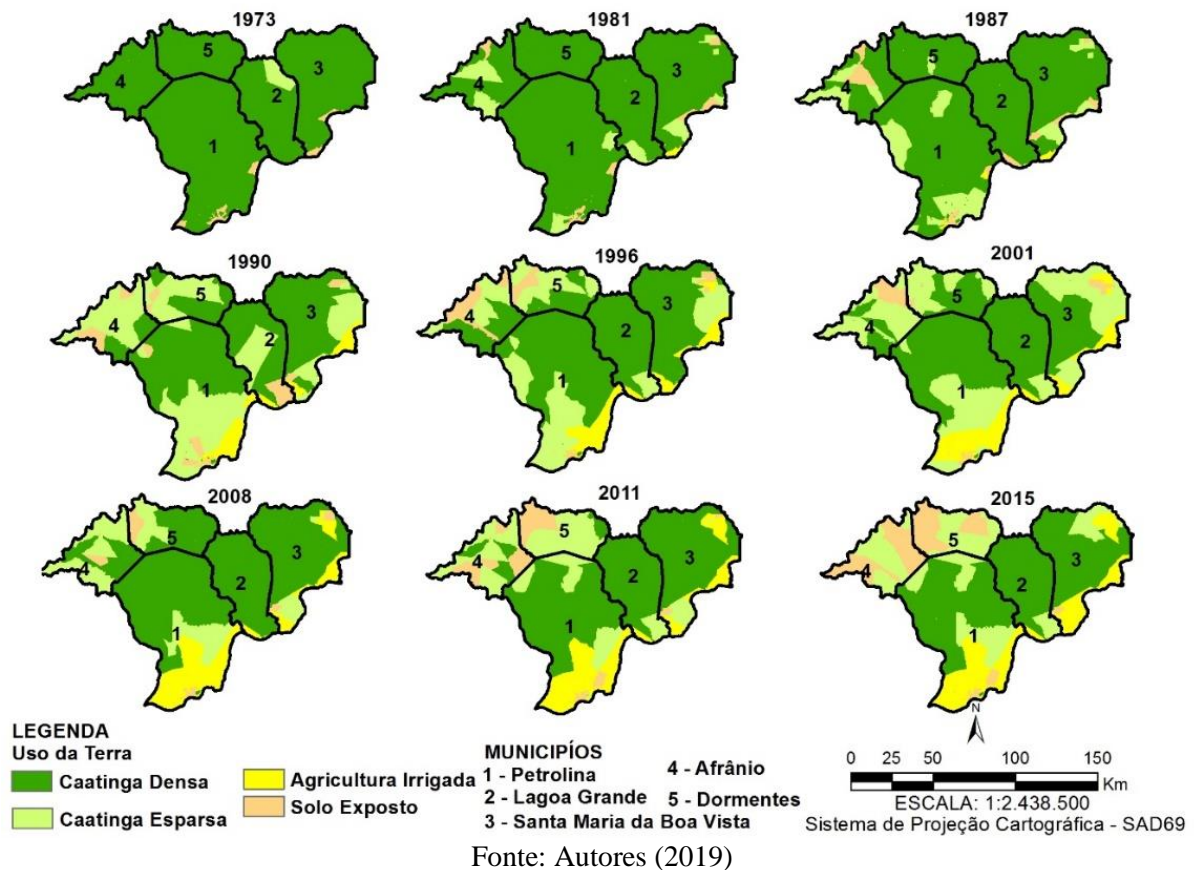
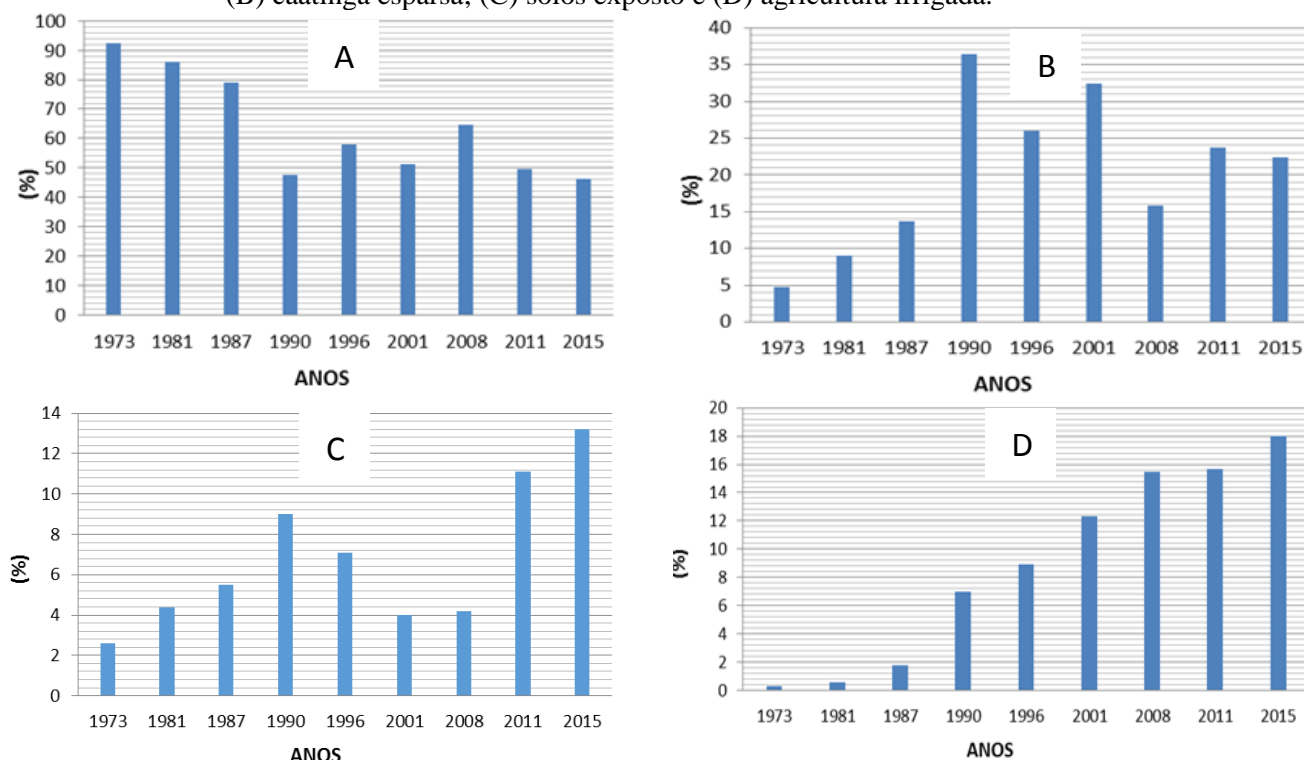


Figura 6 - Quantitativo de área ocupada pelas classes de uso e cobertura das terras: (A) caatinga densa; (B) caatinga esparsa; (C) solos exposto e (D) agricultura irrigada.



Fonte: Autores (2019).

Atributo geologia (rochas) na susceptibilidade à erosão

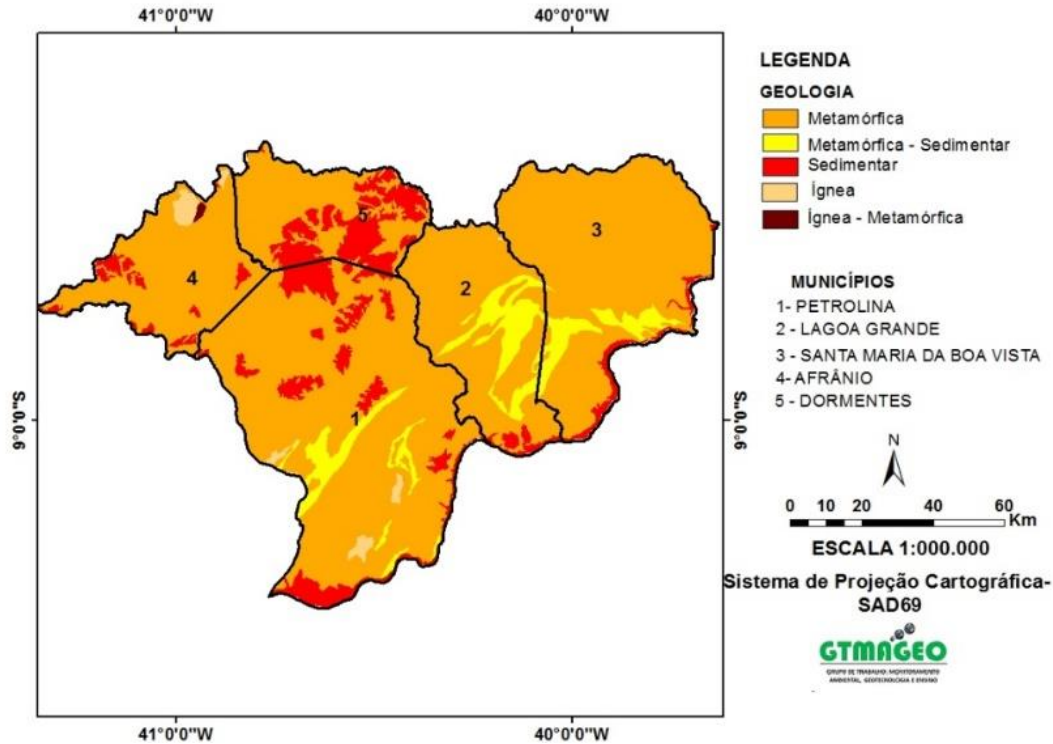
Ao analisar a vulnerabilidade à erosão dos solos, Crepani *et al.* (2008) argumentam que, nas rochas pouco coesas, prevalecem os processos modificadores das formas de relevo, mostrando o contrário das rochas médias e bastante coesas, nas quais prevalecem os processos de formação de solos. Na área de estudo, estão presentes as rochas metamórficas, metamórfica-sedimentar, sedimentar, ígnea e ígnea-metamórfica (Figura 7).

As rochas com baixa coesão tendem a ter um deslocamento maior de sedimentos em comparação com as rochas de maior coesão (CREPANI *et al.*, 2008). A partir daí, as rochas metamórficas, ígneas e ígneas-metamórficas foram classificadas como de muito baixa contribuição na susceptibilidade à erosão.

As rochas sedimentares foram classificadas como de muito alta contribuição na susceptibilidade à erosão, visto que seus agregados possuem fácil remoção em comparação com as demais estruturas rochosas encontradas na microrregião de Petrolina. Compõem a estrutura das rochas sedimentares, na área de estudo, os litotipos formados por: cascalhos, areias; depósitos aluviais; arenitos entre outros, os quais possuem maiores facilidades à desagregação.

Quanto ao complexo formado pelas rochas metamórfica-sedimentar e ígnea-sedimentar, estas foram classificadas com média contribuição para susceptibilidade à erosão, visto que são formados pelo conjunto de composição de rochas resistentes e não resistentes à desagregação.

Figura 7 - Tipologia das rochas presentes na área de estudo



Fonte: Autores (2019)

Susceptibilidade Natural à erosão dos solos

Na área de estudo, 46% das terras possuem muito baixa susceptibilidade à erosão (Figura 8). Essas áreas predominam nos municípios de Petrolina, Lagoa Grande e Santa Maria da Boa Vista (Figura 9). A superioridade da citada classe de susceptibilidade decorre do cruzamento dos atributos físico-naturais, os quais apresentam reduzidas notas no processo de erosão dos solos. Toma-se como exemplo, as áreas que possuem simultaneamente Argissolos ou Latossolos, rochas metamórficas, relevo plano e erosividade com muito baixa contribuição para susceptibilidade à erosão.

Segundo Prasannakumar *et al.* (2018), quando ocorre a combinação de solos com baixo risco de erosão, relevo plano, poucas chuvas e rochas que possuem baixos potenciais de desagregação, os solos tornam-se mais protegidos a possíveis remoções.

Ocupando 31,44%, as áreas de baixa susceptibilidade estão presentes em todos os municípios estudados, sendo que predomina nos municípios de Afrânio e Dormentes (Figura

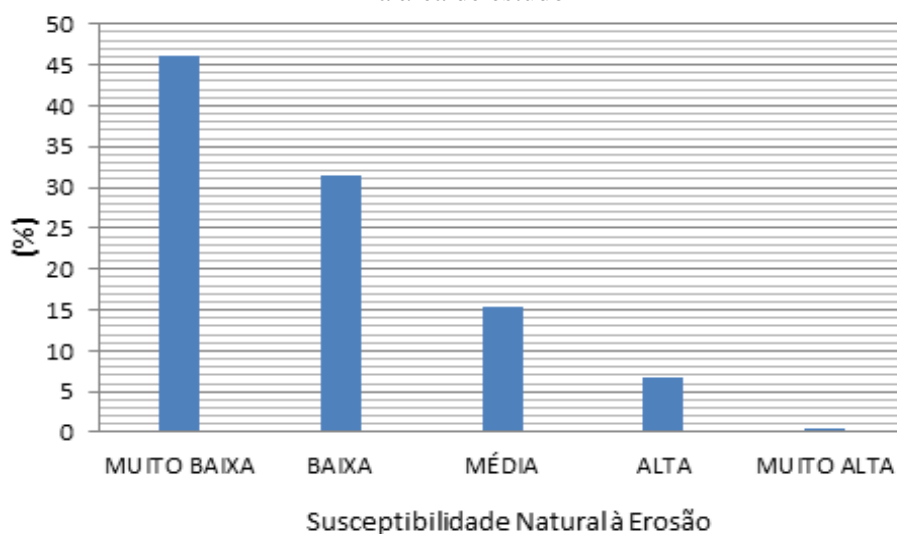
8 e 9). A presença de solos com baixo a médio risco de remoção, associada com relevo suave ondulado, erosividade com média contribuição para susceptibilidade e rochas metamórficas ou metamórficas-sedimentares, indicam que tais paisagens apresentem baixa susceptibilidade à erosão.

As áreas de média susceptibilidade ocupam 15,34% ocorrem em todos os municípios, com destaque em Santa Maria da Boa Vista (Figura 8 e 9). A combinação dos Neossolos Regolíticos e Quartzarênicos, Planossolos com rochas metamórficas, média erosividade e relevo, ora suave-ondulado, ora ondulado levam a esta estrutura de susceptibilidade.

As áreas de alta susceptibilidade ocupam apenas 6,66% de toda a área de estudo. Essa susceptibilidade à erosão está em todos os municípios, sendo que predomina em Lagoa Grande (Figura 8 e 9). Os fatores que, em sua maioria combinados, proporcionam alta susceptibilidade para erosão natural dos solos são: Neossolos Litólicos ou Cambissolos sobre relevo ondulado ou forte-ondulado; rochas ora sedimentares ora metamórficas-sedimentares com erosividade média.

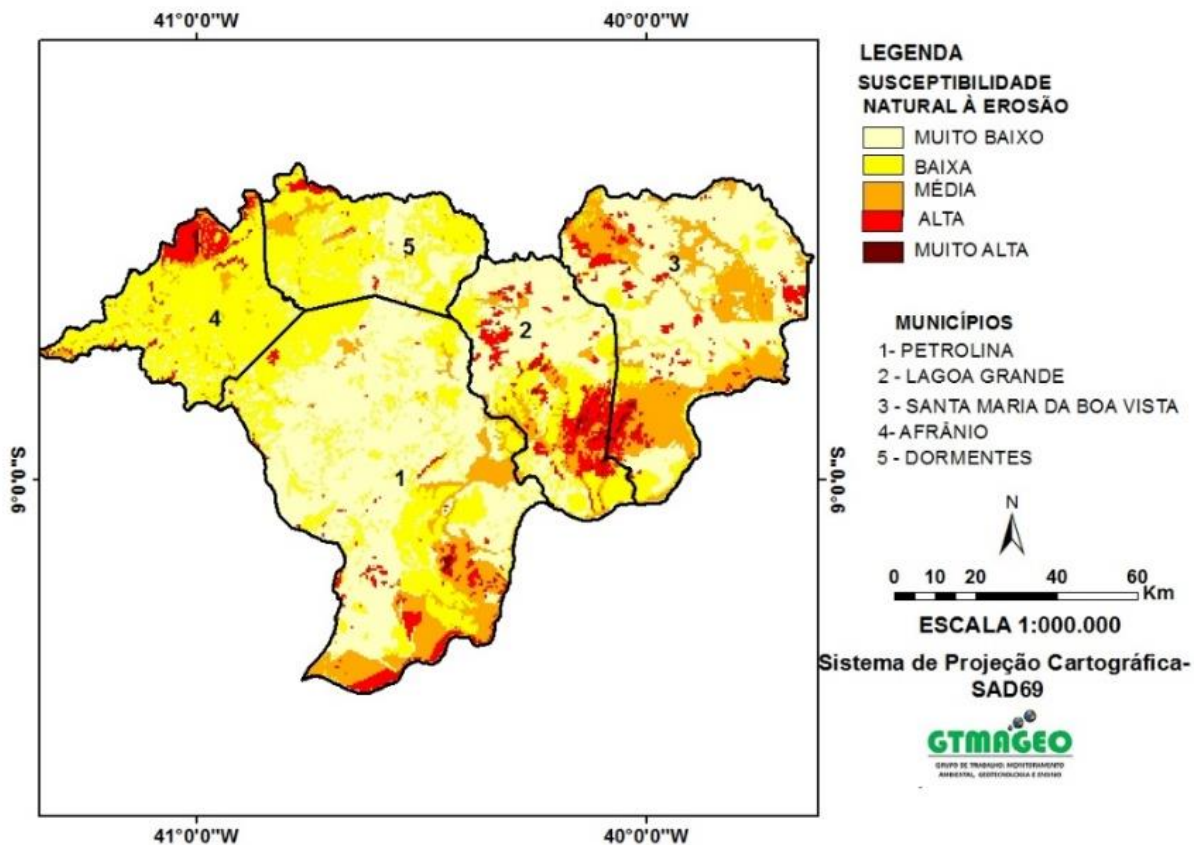
As áreas com maiores tendências à erosão natural ocupam apenas 0,47% (susceptibilidade muito alta). O ponto crucial que define essas áreas são as declividades acentuadas presentes no relevo forte-ondulado. Segundo Aquino, Oliveira e Sales (2006), quanto maior o comprimento e a declividade dessas áreas maiores as susceptibilidades do solo à erosão hídrica. Acrescenta-se ainda que parte dos solos que ocupam esses tipos de relevo são mal desenvolvidos, a exemplo dos Neossolos Litólicos, o que amplia a susceptibilidade à erosão.

Figura 8 - Quantitativo de áreas ocupadas pelas diferentes classes de susceptibilidade natural à erosão na área de estudo



Fonte: autores (2019).

Figura 9 - Susceptibilidade natural à erosão dos solos



Fonte: autores (2019).

Susceptibilidade geral à erosão dos solos e as contribuições no processo de desertificação local

A figura 10 apresenta um conjunto de mapas que engloba a combinação de fatores naturais e humanos no processo de susceptibilidade à erosão dos solos. Para cada ano, é apresentado o quantitativo de áreas nas diferentes classes de susceptibilidade (figura 11). Observa-se que há o predomínio das classes de muito baixa e baixa susceptibilidade à erosão. Porém, ocorrem pequenas variações de queda e aumento entre essas classes ao longo dos 42 anos de estudo.

As áreas com menores impactos (muito baixa susceptibilidade à erosão) ocuparam 44% entre os anos de 1973 a 1987. Porém, com avanço da agricultura irrigada e pequenos focos de desmatamentos nos municípios de Afrânio, Dormentes e no norte de Petrolina, houve reduções destas áreas para 30% em 2015.

A dinâmica de redução é semelhante para as áreas sob baixa susceptibilidade à erosão, a qual acompanha o mesmo ritmo que a classe de muito baixa. Em 1973, cerca de 47% das terras apresentavam baixa susceptibilidade à erosão. Quarenta anos depois, apenas 37% da área de estudo apresenta baixa probabilidade à erosão.

Se as duas classes com menores impactos sofreram reduções, por outro lado, as áreas com média susceptibilidade cresceram e apresentam variações positivas e negativas ao longo dos anos devido à influência das precipitações na cobertura vegetal. Em geral, no ano de 1973, essa classe ocupava 8% da área de estudo, atinge 26% em 2001 e 25% no ano de 2015.

Figura 10 - Susceptibilidade Geral à Erosão dos Solos na área de estudo entre os anos de 1973 a 2015

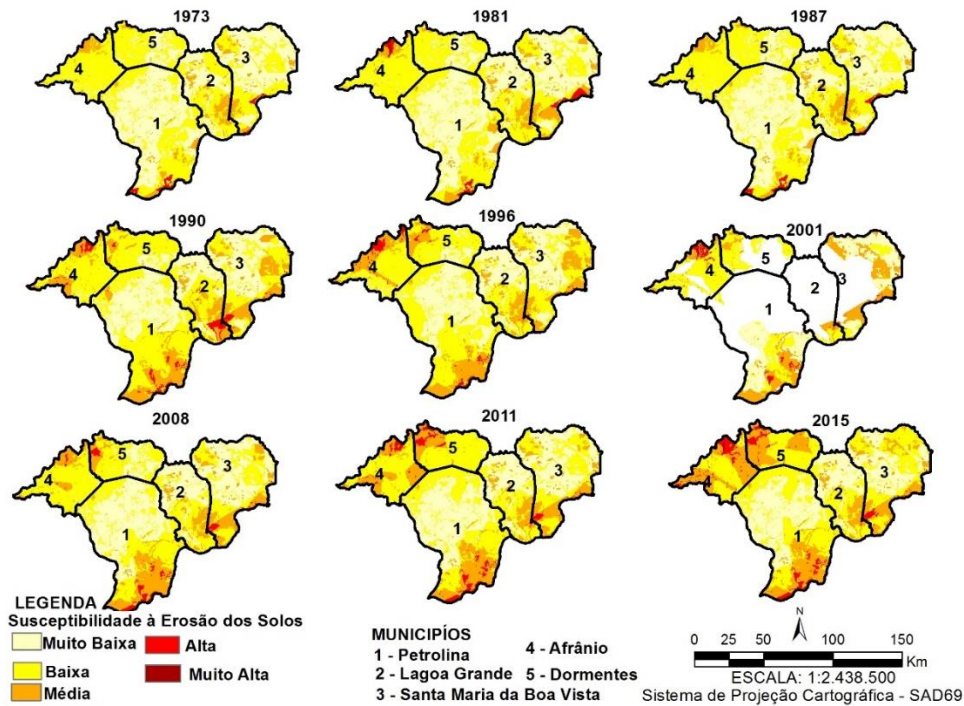
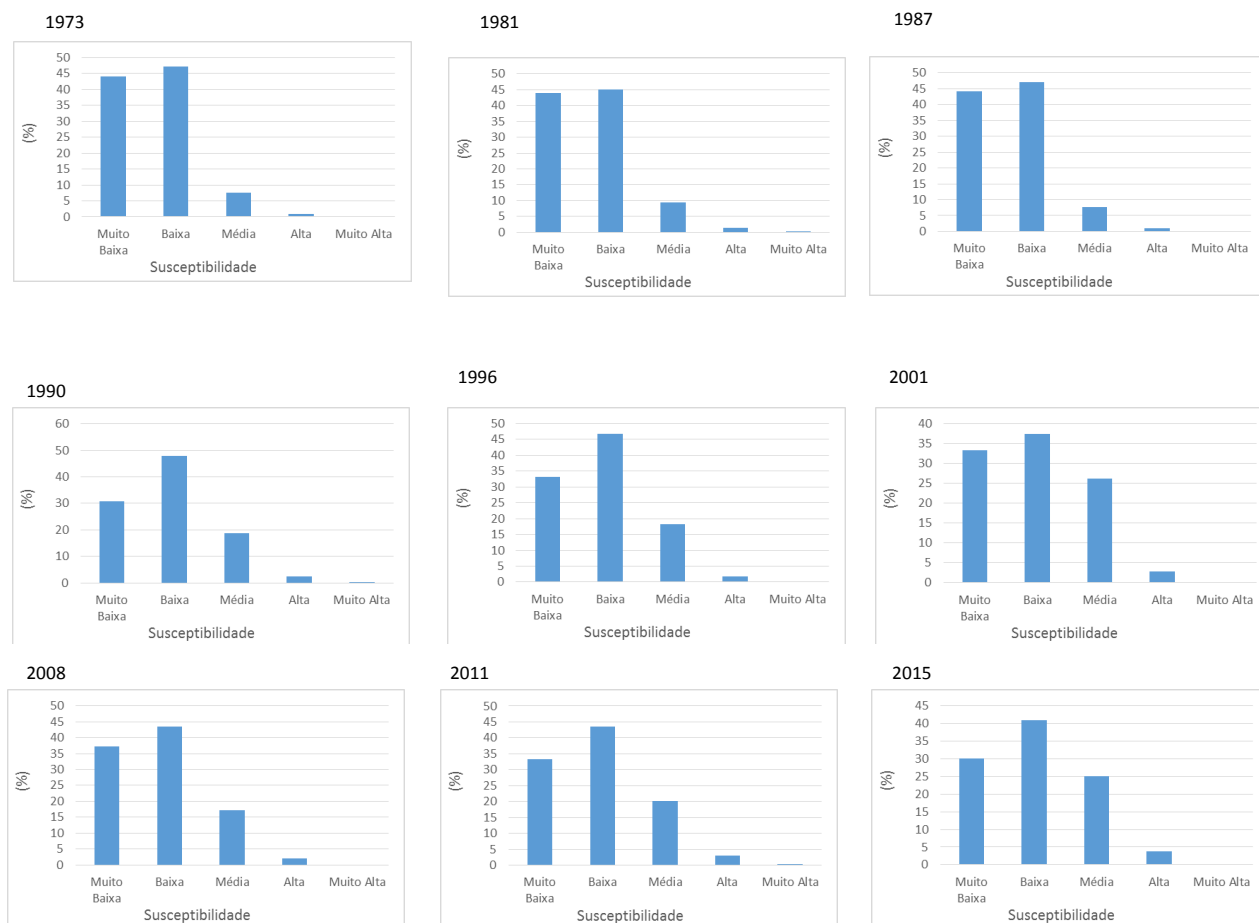


Figura 11 - Quantitativo das áreas susceptíveis à erosão entre os anos de 1973 a 2015



Fonte: autores (2019)

As áreas com alta susceptibilidade também apresentaram crescimento. Em 1973, cerca de 2% da região em estudo era representada por essa classe de risco, enquanto que, no ano de 2015, esse valor chegou a 4%. Para as áreas com muito alta susceptibilidade à erosão, houve variações pequenas, as quais não passaram de 1% para o maior valor no ano de 2011.

Quanto aos municípios em estado crítico de susceptibilidade, destacam-se Afrânio e Dormentes. Nesses municípios, em 1987, a baixa susceptibilidade predominava. Em 1996, surgem manchas com médias susceptibilidades e, em 2015, mais de 50% de suas terras apresenta de média a alta susceptibilidade a erosão. Como foi discutido, nesses municípios, o desmatamento da caatinga para implementação de pastos para criação de ovinos e caprinos, somado à produção de lenha e do carvão vegetal, são os principais impulsionadores para o aumento da susceptibilidade à erosão das terras.

Mudanças podem ser notadas, também, no sul dos municípios de Petrolina, Lagoa Grande e Santa Maria da Boa Vista. O avanço das terras com média e alta susceptibilidade à

erosão estão associadas ao crescimento dos perímetros irrigados, práticas que em muitos dos casos deixam o solo susceptíveis à erosão devido à remoção constante e à desproteção dos mesmos durante a transição ou replantio de cultivos. Ainda sobre esses municípios, próximos aos perímetros irrigados, a pressão direcionada ao desmatamento das caatingas para posteriores avanços da agricultura irrigada e crescimento populacional colabora para o avanço dos riscos de revolvimento dos solos.

Diante do apresentado, torna-se evidente e notório a influência do desmatamento no processo de susceptibilidade à erosão, processo esse incentivado pelo crescimento das áreas sobre agricultura irrigada e, nos locais onde a agricultura irrigada não está presente, o papel principal do desmatamento assenta-se sobre a redução das caatingas para plantio de pastos destinados a ovinocultura e a caprinocultura. Acrescenta-se a retirada da vegetação para produção de lenha e carvão vegetal.

Conseqüentemente, a susceptibilidade à erosão dos solos na área de estudo poderá contribuir para um eventual processo de desertificação a partir de:

- Redução da produção agrícola nas áreas de sequeiro devido à perda de fertilidade dos solos provocada pelo processo de erosão;
- A erosão avançando e sendo concretizada poderá reduzir os horizontes dos solos, restando apenas a rocha e/ou o horizonte C a depender da evolução do solo;
- Os municípios de Afrânio e Dormentes apresentam comprometimento superior a 50% de suas terras à susceptibilidade alta a muito alta à erosão dos solos. Problema que unido com outros fatores de ordem natural e sociais poderão elevar os riscos à desertificação;
- Nas áreas de agricultura irrigada (sul e sudeste de Petrolina, sul de Lagoa Grande e sul e nordeste de Santa Maria da Boa Vista) houve crescimento das áreas entre média a alta susceptibilidade a erosão dos solos. Problemas que aliados a outros fatores poderão, no futuro, contribuir para um eventual processo de desertificação local.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O procedimento adotado para o mapeamento da susceptibilidade à perda de solo nos cinco municípios da microrregião de Petrolina respondeu bem ao esperado, o que retrata a realidade vivenciada na região ao longo das quatro últimas décadas. Porém, por ser um modelo simples outros estudos poderão ser desenvolvidos com métodos que utilizem outros atributos e possam colaborar, ainda mais, no entendimento do processo de perda dos solos na área de estudo.

O mapeamento para o período atual demonstra o predomínio das classes de média a muito baixa susceptibilidade à erosão, comportamento visível, também, nos anos anteriores. Ao longo dos anos, houve um aumento das áreas com média a muito alta susceptibilidade à erosão. Os motivos são vários desde o crescimento das áreas irrigadas à redução da caatinga para implementação de pastos, comercialização da lenha e do carvão vegetal.

O artigo é relevante, pois promove o debate e considera os aspectos fundantes da Geografia: localização, a distribuição, mapeamento, apontou analogias e comparativos sobre as áreas investigadas.

REFERÊNCIAS

AMORIM, R. S. S. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras**. 2003. 123f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2003.

AQUINO, C. M. S.; OLIVEIRA, J. G. B.; SALES, M. C. L. Susceptibilidade das terras secas do distrito de Piauí à desertificação: Avaliação a partir dos índices. **Mercator - Revista de Geografia da UFC**, Fortaleza, v.5, n.9, p.49-60, 2006.

BELTRÃO, B. A.; MASCARENHAS, J. C.; MIRANDA, J. L. F.; SOUZA JUNIOR, L. C.; GALVÃO, M. J. T. G.; PEREIRA, S. N. **Diagnóstico do município de Santa Maria da Boa Vista**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

BERTONI, J.; LOMBARDI, N. F. **Conservação do solo**. 4.ed. São Paulo: Ícone, 1999.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 2ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2013.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T; BARBOSA, C. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico - Econômico e ao Ordenamento Territorial**. INPE: São José dos Campos, 2001.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; L.G.; AZEVEDO, L.G.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento Ecológico- Econômico**. São José dos Campos: INPE, 2011.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; PALMEIRA, A.F.; SILVA, E.F. Zoneamento Ecológico Econômico. In. FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia: Conceitos e Tecnologias Atuais**. São Paulo: Oficina de textos, 2008, p.285-318.

D'ODORICO, P.; BHATTACHAN, A.; DAVIS, K.; RAVI, S.; RUNYAN, C. W. Global desertification: drivers and feedbacks, **Advances in water resources**, n.51, p.326-344, 2013.

EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. In: Reunião técnica de levantamento de solos, 10, 1979, Rio de Janeiro. Súmula. Rio de Janeiro, 1979.

_____. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasília, 2006.

_____. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. EMBRAPA: Rio de Janeiro, 2014.

FERNANDEZ, C.; WU, J. Q., MCCOOL, D. K., STOCKLE, C. O. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD. **Journal of soil and water conservation**, v.58, n.3, p.128-136, 2018.

GUERRA, A. J. T. O Início do Processo Erosivo. In: _____. SILVA, A.S.; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, temas e aplicações**. 8ed. Rio de Janeiro, Editora Bertrand Brasil, p.17-50, 2012.

GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. Erosão dos solos e a Questão Ambiental. In: **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. VITTE; A.C.; GUERRA, A. J. T.(Orgs.). 6ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.225-251, 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**. Disponível < <http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 30 de outubro de 2019.

LEPSCH, I. F. Degradação e Conservação dos Solos. In: **19 Lições de Pedologia**. I. F. LEPSCH (Org.). São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2001, p.407-424.

LIMA, C. R., SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A. Desertificação e seus efeitos na vegetação e solos do cariri paraibano. **Mercator**, Fortaleza, v.8, n.16, p.218, 2009.

MIRANDA, E. E. (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: < <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

MOTA, L. H. S. O.; VALLADARES. G. S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.42, n.1, p.39-50, 2011.

OZSOY, G.; AKSOY, E.; DIRIM, M. S.; TUMSAVAS, Z. Determination of soil erosion risk in the Mustafakemalpaşa River Basin, Turkey, using the Revised Universal Soil Loss Equation, Geographic Information System, and Remote Sensing. **Environmental Management**, v.50, n.4, p.679-694, 2012.

PACHECO, A. P.; FREIRE, N. C. F.; BORGES, U. N. A transdisciplinaridade da desertificação. **Revista do Departamento de Geociências**, v 15, n.1, p. 5-34, 2006.

PANDEY, A.; CHOWDARY, V. M; MAL, B.C. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. **Water Resources Management**, v.21, n.4, p.729-746, 2017.

PRASANNAKUMAR, V.; VIJITH, H.; ABINOD, S. ; GEETHA, N. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. **Geoscience frontiers**, v.3, n.2, p.209-215, 2018.

SANTOS, K. P; SANTOS, A. M. Uso da terra, cobertura vegetal e desertificação no Projeto de Irrigação N11 – Petrolina, PE, Brasil. **Terr@Plural**, Ponta Grossa, v.13, n.2, p.385-399, 2019.

SALIH, A. A. M.; GANAWANA, E. T.; ELMAHL, A. A. Spectral mixture analysis (SMA) and change vector analysis (CVA) methods for monitoring and mapping land degradation/desertification in arid and semiarid areas (Sudan), using Landsat imagery. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v.20, n.1, p. 21-29, 2017.

SILVA, F.H.B.B.; SILVA, A.B.; BARROS, A.H.C. **Principais classes de solos do estado de Pernambuco**. EMBRAPA: Recife, 2008.

TIWARI, A.K.; RISSE, L.M.; NEARING, M.A. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE

and RUSLE. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.5, n.43, p.1.129-1.135, 2019.

VASCONCELOS, J. V. **Processos de desertificação no nordeste do Brasil: Suas Gênese e sua Contenção**. Recife: Sudene/ Mimeogr, 1983.

ZALOTI, F. A.; SANTOS, P. S.; NASCIMENTO, D. M. C. Uso da geoinformação para geração de vulnerabilidade potencial à erosão e vulnerabilidade à erosão: Ilha de Itaparica-Bahia. **Bahia análise & dados**, v.25, n.4, p.789-802, 2015.

ZAPE. **Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco**. CD-Rom. EMBRAPA: Recife, 2006.