



**INSTITUTO FEDERAL**

Sertão Pernambucano

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO**

**PERNAMBUCANO**

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, INOVAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO (PROPIP)**

**CAMPUS SALGUEIRO**

**PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM RECURSOS HIDRICOS PARA O SEMIÁRIDO**

**CARLOS DE OLIVEIRA BISPO**

**Aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP) em Sistemas de  
Informação Geográfica (SIG) para avaliação do perigo à erosão**

Salgueiro - PE

2024

**CARLOS DE OLIVEIRA BISPO**

**Aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP) em Sistemas de  
Informação Geográfica (SIG) para avaliação do perigo à erosão**

Monografia apresentada ao curso de Pós-graduação *Lato Sensu* em Recursos Hídricos para o Semiárido, ofertado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Recursos Hídricos para o Semiárido.

Orientador: Clecia Simone Gonçalves  
Rosa Pacheco.

Salgueiro - PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

B621 Bispo, Carlos de Oliveira.

Aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP) em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para avaliação do perigo à erosão / Carlos de Oliveira Bispo. - Salgueiro, 2024.  
21 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Recursos Hídricos) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, 2024.

Orientação: Profª. Drª. Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco.

1. Gestão ambiental. 2. Geoprocessamento. 3. Recursos hídricos. 4. Risco socioambiental. I. Título.

CDD 363.7

---



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulada **Aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP) em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para avaliação do perigo à erosão**, sob orientação de Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco, apresentada pelo aluno **Carlos de Oliveira Bispo (202227080010)** do Curso **ESPECIALIZAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS PARA O SEMIÁRIDO (Salgueiro)**. Os trabalhos foram iniciados às 19h10min pela Professora presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco** (Presidente)
- **Christianne Farias da Fonseca** (Examinadora Interna)
- **Eduardo Paes Barreto** (Examinador Interno)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

Aprovado

Reprovado

Nota (quando exigido): 10,0

**Observação / Apreciações:**

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Salgueiro / PE, 18/09/2024

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CHRISTIANNE FARIAS DA FONSECA  
Data: 19/09/2024 10:01:32-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Christianne Farias da Fonseca**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CLECIA SIMONE GONCALVES ROSA PACHECO  
Data: 18/09/2024 21:14:06-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** EDUARDO PAES BARRETO  
Data: 19/09/2024 12:00:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Eduardo Paes Barreto**

# **Aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP) em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para avaliação do perigo à erosão**

Application of the Analytical Hierarchical Process (AHP) in Geographic Information Systems (GIS) for erosion hazard assessment

Carlos de Oliveira Bispo; Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco.

## **Resumo**

O objetivo deste artigo foi avaliar o perigo à erosão na face leste da Chapada do Araripe, Nordeste do Brasil, por meio do modelo AHP (*Analytic Hierarchy Process*) em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica). Para cumprir o objetivo proposto confeccionou-se uma carta de perigo à erosão dividida em cinco classes: Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta, produzida a partir da integração de cinco parâmetros geoambientais: Geologia, Solos, Declividade, Pluviosidade e Uso da Terra. Tais parâmetros foram submetidos à categorização das suas classes, ponderação das variáveis via AHP e cruzamento geoespacial a partir de álgebra de mapas em ambiente SIG, o que permitiu a espacialização do fenômeno estudado. A validação da carta de perigo foi realizada a partir da identificação de processos erosivos identificados em trabalhos de campo. Nos resultados as classes de perigo à erosão, apresentaram respectivamente, as seguintes Frequências de Distribuição: Muito Baixa 28%, Baixa 20,5%, Moderada em 12,4%, Alta 28,1%, Muito alta 11%. Os locais mais críticos estão localizados, predominantemente, nas encostas mais declivosas, principalmente na região da escarpa e no seu sopé. Conclui-se que a metodologia apresentada foi eficiente ao avaliar o perigo à erosão, proporcionando subsídios para o planejamento e a gestão ambiental.

**Palavras - chave:** Geoprocessamento, Recursos hídricos, Risco socioambiental.

## **Abstract**

The objective of this article was to evaluate the danger to erosion on the east side of Chapada do Araripe, Northeast Brazil, using the AHP (*Analytic Hierarchy Process*) model in a GIS (Geographic Information Systems) environment. To achieve the proposed objective, an erosion hazard map was created divided into five classes: Very Low, Low, Medium, High and Very High, produced from the integration of five geoenvironmental parameters: Geology, Soil, Slope, Rainfall and Use from the earth. Such parameters were subjected to categorization of their classes, weighting of variables via AHP and geospatial crossing using map algebra in a GIS environment, which allowed the spatialization of the studied phenomenon. The validation of the hazard map was carried out based on the identification of erosive processes identified in field work. In the results, the erosion hazard classes respectively presented the

following Distribution Frequencies: Very Low 28%, Low 20.5%, Moderate 12.4%, High 28.1%, Very High 11%. The most critical locations are predominantly located on the steepest slopes, mainly in the escarpment region and at its foot. It is concluded that the methodology presented was efficient in assessing the danger to erosion, providing support for planning and environmental management.

**Keywords:** Geoprocessing, Mapping, social and environmental risk.

## **Introdução**

O solo, enquanto recurso natural é crucial para as atividades econômicas e sociais que sustentam a humanidade, incluindo a produção de alimentos e a construção de moradias. No entanto, a utilização inadequada desse recurso natural, sem planejamento e manejo apropriados, pode resultar em sua degradação e provocar diversos problemas, tais como, erosões e escorregamentos de encostas, ensejando em prejuízos consideráveis tanto para a natureza quanto para os seres humanos (Pruski, 2009; Lepsch, 2010).

Na perspectiva geomorfológica, os processos erosivos são estudados enquanto processos naturais que atuam na modelação da superfície terrestre. Suas causas e formas resultantes são interpretados no contexto do funcionamento dos processos da geodinâmica externa. As encostas configuram-se como ambientes bastante dinâmicos, onde os processos naturais como erosão e escorregamentos ocorrem frequentemente (Selby, 2005; Guerra, 2008; Lepsch, 2010).

Conforme observado por Tricart (1997), os processos erosivos, são fenômenos morfodinâmicos de significativa relevância na dinâmica da superfície terrestre, e apresentam potencial para desencadear variadas situações de instabilidade quando sua manifestação ocorre de forma acelerada. É crucial salientar que, apesar de a erosão ser um fenômeno natural decorrente do desgaste dos solos devido à ação dos agentes exógenos, tais como água, vento e sol, sua intensificação é notadamente potencializada pela interferência humana (Wang *et al.*, 2016).

A erosão hídrica é caracterizada pela desintegração dos agregados do solo devido ao impacto das gotas de chuva, seguida pelo transporte desses fragmentos através do escoamento superficial e, finalmente, sua deposição no nível de base. Esse processo ocorre quando a velocidade do escoamento diminui em resposta a fatores como inclinação, rugosidade e/ou cobertura da encosta (Tricart, 1977; Selby, 2005; Lepsch, 2010; Bertoni; Lombardi-Neto, 2012; Guerra *et al.*, 2017).

A erosão se constitui em um grande problema que acarreta implicações substanciais na disponibilidade de terras agrícolas, na produção alimentar e na qualidade dos recursos hídricos (Pruski, 2009; Wang *et al.*, 2016; Pereira; Rodrigues, 2020; Gholamia; Sahourb; Amric, 2021). Nesse contexto, a realização de estudos de perigo à erosão apresenta um potencial significativo para contribuir como suporte ao planejamento e otimização do uso da terra, prevenindo desafios ambientais futuros, tais como, o assoreamento e poluição de rios, além da degradação da fertilidade e produtividade do solo.

A integração de parâmetros do meio físico como (Geologia, Solos, Declividade, Pluviosidade) e do meio antrópico (Uso da Terra), podem ajudar na avaliação dos graus de perigo a erosão de áreas ambientalmente afetadas. A opção teórica pelo termo perigo está embasada em Tominaga *et al.* (2004) que o entende como condição com potencial para causar perdas e danos, o mapeamento de processos perigosos devem ser caracterizados por sua localização, intensidade e probabilidade. Nesse sentido, cartas de perigo à erosão são cruciais para o planejamento geoambiental, prevenindo potenciais problemas ambientais futuros, tais como o assoreamento de rios, degradação da fertilidade e produtividade do solo.

Xavier e Listo (2020) destacam que avanços no controle da erosão têm sido alcançados por meio da aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). As técnicas de geoprocessamento são amplamente recomendadas para avaliar processos morfodinâmicos da paisagem, como a erosão. A utilização do SIG é essencial, pois, permite a integração de metodologias e variáveis, facilitando espacialização de diversos processos geoambientais. Sendo assim, modelos de erosão baseados em SIG podem ajudar a mapear o potencial erosivo do solo, identificar áreas que apresentam maior perigo à erosão do solo e planejar a implementação de medidas de conservação da paisagem.

Nesta pesquisa adota-se o modelo *Analytic Hierarchy Process* (AHP), concebido por Saaty (1991), para avaliar a probabilidade de erosão na face leste da Chapada do Araripe, NE do Brasil, por meio de análise multicritério em consórcio com técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG. A Chapada do Araripe desempenha um papel fundamental no semiárido nordestino, contribuindo significativamente para a recarga dos aquíferos, graças à sua elevada altitude e maior volume de precipitações em comparação com as áreas circundantes (Morales e Assine, 2015; Guerra; Souza; Silva 2020). No entanto, esse geoambiente também

apresenta perigos relacionados a processos erosivos, que podem comprometer a estabilidade do solo e a integridade dos ecossistemas locais. Diante desse cenário, o estudo da suscetibilidade a escorregamentos se torna essencial para o planejamento e a gestão ambiental da região.

Metodologias como a AHP, modelo fundamentado em uma base matemática, organiza e avalia hierarquicamente a importância relativa dos fatores condicionantes dos processos, verificando a consistência dos pesos atribuídos (Saaty, 1991; 2008), tem sido amplamente empregado nacional e internacionalmente, proporcionando resultados precisos. O AHP auxilia na escolha das melhores alternativas em situações que vários objetivos deverão ser alcançados simultaneamente.

Tal método requer um processo de estruturação ou de modelagem para se chegar às alternativas que melhor atendam aos objetivos almejados. Para Raffo (2012), o AHP permite ponderar, quantitativamente variáveis mediante interação do pesquisador com o modelo matemático, inserindo, assim, considerações qualitativas.

Para Kiker (2005) e Wu Wang (2007) a combinação de AHP e SIG representa um suporte importante para estudos geoambientais. Nesse sentido, Cartwright, Shammi e Rodgers (2022) fizeram uso da Análise de Decisão Multicritério, a partir do AHP em ambiente SIG para mapear o Potencial de Erosão em Bacias Hidrográficas do Golfo do México. Os autores destacaram que a modelagem conjunta para mapeamento do potencial de bacias hidrográficas, proporcionou a vantagem de mapear, mais rapidamente, o potencial erosivo das bacias em análise, visando uma melhor gestão dos recursos ambientais ligados à erosão.

Ante ao exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o perigo à erosão na face leste da Chapada do Araripe, Nordeste do Brasil, por meio do modelo AHP (*Analytic Hierarchy Process*) em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica).

## **Material e métodos**

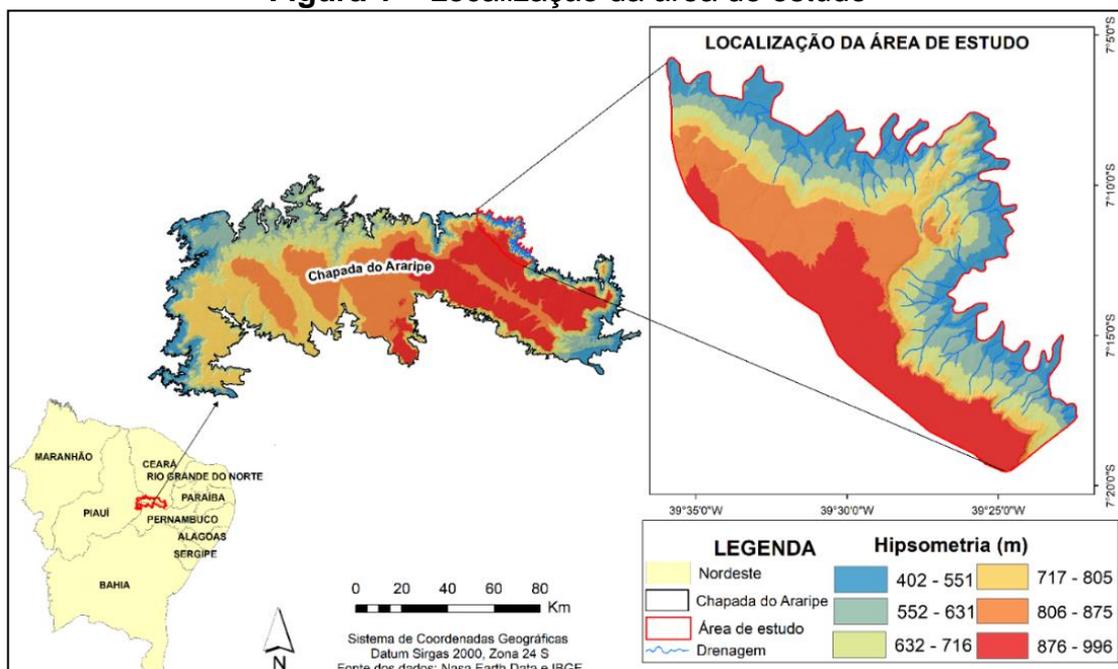
### **Área de estudo**

A Chapada do Araripe, constitui-se num planalto sedimentar em média de 900 metros de altitude, configura-se como um dos relevos de maior expressão altimétrica do Semiárido brasileiro. A área tem aspectos climáticos distintos do Semiárido Cearense nas porções da Depressão Sertaneja, o que a torna um ambiente de exceção climática/brejo de altitude (Morales e Assine, 2015; Guerra; Souza; Silva

2020). Em decorrências das elevadas altitudes, o domínio da Chapada apresenta clima subúmido com temperatura amena e pluviosidade média anual superior a 1000 mm, tendo forte influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (IPECE, 2012).

A área estudada (287 km<sup>2</sup>) está voltada para o município do Crato (CE) sob influência das bacias do rio Granjeiro e do rio Batateira, situadas na face oriental da Chapada do Araripe, no Nordeste brasileiro (Figura 1).

**Figura 1 – Localização da área de estudo**



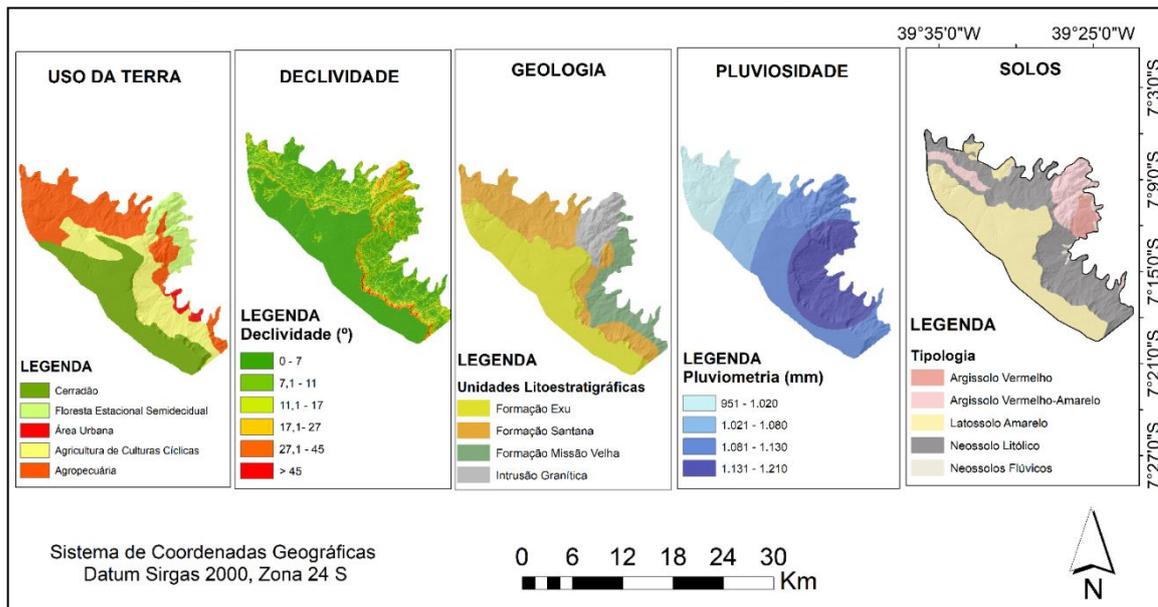
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os solos da área foram compartimentados pela Funceme (2012) em: Argissolo Vermelho; Argissolo Vermelho-Amarelo; Latossolo Amarelo; Neossolo Litólico e Neossolos Flúvicos. No contexto geológico/geomorfológico, apresenta relevos altimetricamente elevados e declivosos, a vertente da Chapada do Araripe tem aspecto de um anfiteatro convergente côncavo voltado para nordeste. O Platô e a Escarpa Erosiva são compostos pela Formação Exu, as Rampas Pedimentadas correspondem a Formação Santana e a Depressão Periférica pela Formação Barbalha (Paiva *et al.* 2017). São essas confluências de fatores físicos naturais que contribuem para que a área estudada seja cenário de processos morfodinâmicos, que juntamente aos diversos tipos de uso da terra contribuem para elevação da probabilidade do perigo à erosão.

## Parâmetros e cenário de Perigo à Erosão via Modelo AHP

A carta de Perigo à Erosão foi obtida por meio de uma análise sistêmica de parâmetros antrópicos (Uso da Terra) e físico-naturais (Declividade, Geologia, Pluviosidade, Solos) (Figura 2).

**Figura 2** - Parâmetros utilizados na modelagem com o AHP



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O parâmetro topográfico declividade proveniente de dados disponibilizados, gratuitamente, pelo satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), com resolução de 12,5 m, foi gerado a partir de uma rotina automatizada no *software ArcGIS*, dentro da caixa de ferramentas *ArcToolbox /3D Analyst Tools/Raster Surface*. O mapa está configurado com seis classes, obedecendo os seguintes intervalos: 0-7°, 7,1°-11°, 11,1°- 17°, 17,1°- 27°, 27,1°- 45°, > 45° (IPT, 2012).

O parâmetro geológico (1:100.000) foi adquirido por meio da compilação de dados do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2014). O parâmetro solo (1:100.000) adquirido a partir do reconhecimento de média intensidade dos solos da mesorregião sul cearense (Funceme, 2012).

Já o parâmetro da pluviosidade foi gerado a partir das médias de precipitação de oito postos pluviométricos situados na proximidade da área de estudo (Funceme, 2012). O banco de dados possui os valores de chuvas diárias acumuladas (mm/dia) e chuvas mensais acumuladas (mm/mês) séries entre 1974 e 2019. Para a

especialização destes dados e aquisição do mapeamento (1:100.000), empregou-se a interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (*IDW - Inverse Distance Weighting*), por meio das ferramentas *ArcToolbox/ Spatial Analyst Tools/ Interpolation* no *ArcMap*.

O mapa de Uso da Terra (1:100.000) foi adaptado de Barbosa, Bispo e Listo (2022), as classificações da legenda de uso e cobertura seguiram as indicações do Manual Técnico de Uso e Cobertura da Terra do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE (2013).

### **Graus de Perigo à Erosão para cada classe dos parâmetros**

Anteriormente à hierarquização dos pesos no AHP, foram definidos cinco níveis de perigo à erosão para cada um dos parâmetros supracitados (Declividade, Geologia, Solos, Pluviosidade e Uso da Terra). Para isso, foi necessário, primeiramente, classificar os atributos dos mapas no *software ArcGIS* por meio da ferramenta *Spatial Analyst Tools/Reclass/Reclassify*, reclassificando-os em uma coluna de “notas”, que resultou nos seguintes níveis de suscetibilidade (para cada atributo): 1 = Muito Baixo, 2 = Baixo 3= Médio, 4 = Alto e 5 = Muito Alto (Tabela 1).

Para determinar os graus de perigo de cada classe dos parâmetros, foram adotados os seguintes critérios: análises conduzidas na área de estudo com base em mapeamentos e trabalhos de campo, além de avaliações fundamentadas na literatura especializada sobre regiões com características ambientais similares, conforme indicado em pesquisas como as de Crepani *et al.* (2001); Peulvast; Bétard; Magalhães (2011), Gurgel *et al.* (2013), Bastos, Peulvast (2016), Agra e Andrade (2020), Xavier e Listo (2020).

Após atribuir os graus de suscetibilidade a cada parâmetro (mapas base), os mapas foram convertidos em formato raster no *software ArcGIS*, com vistas a realização da álgebra de mapas. Esse procedimento foi realizado utilizando a ferramenta “*Map Algebra*” na caixa de ferramentas *ArcToolbox* do *ArcGIS*, por meio da calculadora *raster* onde ocorreu a inserção dos pesos

**Tabela 1** - Atribuição dos graus de perigo à erosão para cada classes dos parâmetros (Geologia, Solos, Declividade, Pluviosidade e Uso da Terra)

Parâmetros	Classes	Características gerais	Grau de Perigo à Erosão
Geologia	Intrusão Granítica	Corpo granitoide de idade pré-cambriana.	1
	Formação Missão Velha	Arenitos grossos mal selecionados de formação fluvial.	3
	Formação Santana	Camada estratigráfica pouco permeável, predominância de camadas de arenitos, siltitos e folhelhos.	5
	Formação Exu	Litologia sedimentar permoporosa com arenitos grossos intercalados com arenitos conglomeráticos.	2
Solos	Neossolos Flúvicos	Solos profundos restritos às faixas de deposições e às margens dos cursos d'água.	1
	Latossolos	Solos estáveis e uniformes e com boa permeabilidade.	2
	Argissolos	Solos com teor substancial de argila com atividade alta, limitando sua drenagem natural.	3
	Neossolos Litólicos	Solos não hidromórficos, pouco desenvolvidos. Em geral rasos, encontrados associados a afloramentos rochosos.	5
Declividade	0° - 7°	Relevo plano a suave ondulado	1
	7,1° - 11°	Relevo plano a quase ondulado	2
	11,1° - 17°	Relevo ondulado	3
	17,1° - 27°	Relevo ondulado	4
	27,1° -45°	Relevo forte ondulado.	5
	>45°		
Pluviosidade	951 – 1020	Pluviometria abaixo da média histórica, valor médio anual (1988-2019).	3
	1021 – 1130	Pluviometria intermediária, considerando o valor médio anual (1988-2019).	4
	>1130	Pluviometria representativa, considerando o valor médio anual (1988-2019).	5
Uso da Terra	Cerradão	Formação Florestal xeromórfica, estrato arbóreo entre 8 m e 15 m	1
	Floresta Estacional Semidecidual	Transição entre as vegetações dos climas úmidos e secos.	2
	Área Urbana	Perímetro de área da cidade do Crato	3
	Agricultura de Culturas Cíclicas	Plantações, sítios, imóveis residenciais e balneários	4
	Agropecuária	Áreas de plantio e cultivo da terra e a criação de animais.	5

Fonte: Elaboração própria (2024).

## Estruturação dos Pesos dos Parâmetro via AHP e confecção da carta de Perigo à Erosão

A carta de suscetibilidade foi realizada, inicialmente, por meio da estruturação hierárquica do modelo AHP considerando os parâmetros supracitados, mostrados na Figura 2 (Uso da terra, Declividade, Geologia, Pluviosidade e Solos). A comparação pareada dos elementos constitui-se em um julgamento comparativo por meio da atribuição de pesos, procurando-se determinar a importância relativa de cada elemento de um nível hierárquico com relação a cada critério no nível imediatamente superior. Os pesos serão determinados a partir da escala de julgamentos (Escala Fundamental) (Tabela 2).

**Tabela 2 - Escala Fundamental da AHP.**

<b>Intensidade de Importância em uma escala absoluta</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
1	Igual Importância	Duas atividades contribuem igualmente com o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
5	Essencial ou forte importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e seu domínio é demonstrado na prática
9	Extremamente importante	A evidência favorece uma atividade sobre a outra é da mais alta ordem possível de afirmação
2,4,6,8	Valores intermediário entre dois julgamentos adjacentes	Quando o compromisso é necessário

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

A partir dos cinco parâmetros adotados (Geologia, Uso da terra, Declividade, Pluviosidade e Solos) foi utilizada uma matriz quadrada, com análise pareada, de acordo com a Escala Fundamental da AHP, culminando em um peso para cada parâmetro. Para determinar a importância relativa de cada critério, foram realizadas comparações pareadas (Tabela 3).

**Tabela 3-** Matriz quadrada de correlação pareada dos parâmetros avaliados

Parâmetros	Geologia	Uso da terra	Declividade	Pluviosidade	Solos
<b>Geologia</b>	1	0,50	0,50	0,33	0,33
<b>Uso da terra</b>	2	1	1	0,50	0,50
<b>Declividade</b>	2	1	1	1,00	1,00
<b>Pluviosidade</b>	3	2	1	1	1
<b>Solos</b>	3	2	1	1	1

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a comparação pareada, foi realizada a normalização dos valores, cujo valor de importância determinado para cada par é dividido pelo somatório dos valores de cada coluna. Desta forma, para a aquisição do valor do peso (**w<sub>i</sub>**) de cada critério, é realizada a divisão do somatório de cada linha (**ΣL**) pelo número de critérios analisados, adquirindo-se assim o peso de cada um dos critérios (exemplo na Tabela 4).

**Tabela 4 -** Matriz de Normalização dos parâmetros avaliados

Parâmetros	Geologia	Uso da terra	Declividade	Pluviosidade	Solos	<b>W<sub>i</sub></b> (peso)
<b>Geologia</b>	0,09	0,08	0,11	0,09	0,09	0,09
<b>Uso da terra</b>	0,18	0,15	0,22	0,13	0,13	0,16
<b>Declividade</b>	0,18	0,15	0,22	0,26	0,26	0,22
<b>Pluviosidade</b>	0,27	0,31	0,22	0,26	0,26	0,26
<b>Solos</b>	0,27	0,31	0,22	0,26	0,26	0,26
Razão de Consistência (CR)						0,01

Fonte: Elaboração própria (2024).

Após a comparação pareada e a respectiva normalização dos parâmetros buscou-se o valor de consistência, com vistas a confirmar a acurácia do resultado obtido, por meio do cálculo da Razão de Consistência (RC). Este permite avaliar a inconsistência em função da ordem da matriz de julgamentos (Equação 1).

$$RC = IC / IR \quad \text{Equação 1}$$

**Onde:** RC = Razão de Consistência; IC = Índice de Consistência) e IR = (Índice Randômico)

O Cálculo do Índice de Consistência (IC) avalia o grau de inconsistência da matriz de julgamentos paritários (Equação 2).

$$IC = (\lambda_{max} - n) / (n - 1), \text{ onde o } \lambda_{max} = 1/n \sum_{i=1}^n [Aw] / w_i \quad \text{Equação 2}$$

**Onde:** n = número de ordem da matriz;  $\lambda_{max}$  = autovetor;  $W_i$  = pesos calculados e  $A_w$  = Produto entre  $W_i$  com a matriz de correlação pareada

A tolerabilidade da inconsistência desta matriz é denominada Índice Randômico, fornecido por uma tabela de valores (Tabela 5) e é função da dimensão da matriz de comparação. O IR é obtido para uma matriz randômica recíproca, com elementos não-negativos. Inúmeros tamanhos de matriz N foram aproximados por Saaty (1991), tendo como base simulações em laboratório.

Tabela 5 - Valores de IR em função da ordem da matriz quadrada

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0	0	0,53	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,52	1,54	1,56	1,58	1,59

Fonte: Saaty (2008).

A partir do IC e do IR, obtém-se o valor da Razão de Consistência (RC). A RC avalia a coerência e a consistência das relações de importância consideradas na análise. Se a RC for superior a 0,10, os julgamentos dos condicionantes devem ser revisados devido a incoerências. Quanto mais próxima de "0" for a RC, mais coerente será o modelo (Carvalho, Riedel, 2005; Saaty 1991, 2008). A razão de consistência obtida para o cenário de perigo à erosão produzido neste artigo foi de 0,01, portanto dentro dos limites recomendados pela literatura especializada. A carta de Perigo à erosão, foi realizada em ambiente SIG por meio da Equação 3.

$$PE = S*0,26 + P*0,26 + D*0,22 + G*0,09 + Ut*0,16 \quad \text{Equação 3}$$

**Onde:** PE=Perigo à erosão; S= Solos; P= Pluviosidade; D= Declividade; G= Geologia; Ut= Uso da terra.

Com vistas a melhor explicar a espacialização das classes de perigo à erosão foi calculado a Frequência de Distribuição (FD) das classes do cenário de perigo a erosão, conforme a Equação 4.

$$FD = \frac{\text{nº de células de cada classe}}{\text{Total de células}} * 100 \quad \text{Equação 4}$$

## Resultados e discussão

Os parâmetros físicos-naturais e antrópicos utilizados para a elaboração da carta de perigo à erosão foram significativos para aquisição dos resultados desta pesquisa, em harmonia com o contexto observado em campo e amparados na literatura especializada como observado em Crepani *et al.* (2001); Peulvast; Bétard; Magalhães (2011), Gurgel *et al.* (2013), Bastos, Peulvast (2016), Agra e Andrade (2020), Xavier e Listo (2020).

A classificação dos critérios quantificou os pesos com base em sua importância relativa na área de estudo, por grau de importância os parâmetros foram hierarquizados na seguinte ordem: Solos (26%), Pluviosidade (26%), Declividade (22%), Uso da terra (16%) e Geologia (9%), a integração destes impactaram no resultado exportado pela carta de perigo a erosão, gerada pelo do modelo AHP em consórcio com técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG (Figura 3a). Selby (2005) considera os aspectos climáticos, pedológicos, geológicos e vegetação como os condicionantes de maior relevância no estabelecimento dos processos erosivos.

As áreas que apresentaram maior perigo à erosão (classes Muito Alta e Alta), estão localizadas, predominantemente, nas encostas mais declivosas, principalmente na região da escarpa e no seu sopé (Figuras 3 b; c), recoberta por neossolos litólicos, em áreas onde predominam o uso da terra voltado para o cultivo de culturas cíclicas e para a agropecuária, em meio importantes áreas de nascentes hidrográficas, mormente, as nascentes dos rios Granjeiro e Batateiras. Em termos geológicos, a Formação Santana e a Formação Missão velha são as que mais contribuíram para o aumento do perigo à erosão.

Paiva *et al.* (2017) em estudo geológico-geomorfológico na Chapada do Araripe constatou que há confluências de fatores físicos naturais que contribuem para que a área estudada seja cenário de processos morfodinâmicos consideráveis, os autores destacam a relação altitude/amplitude dos compartimentos do relevo, a ocorrência de chuvas intensas em curto espaço de tempo e as características texturais das camadas sedimentares da bacia do Araripe.

No tocante a erosão do solo, os autores supracitados relatam que em épocas de chuvas extremas, enxurradas geram carreamento de material sedimentar composto por blocos métricos da Formação Exu e material argiloso dos calcários e folhelhos da Formação Santana. Vale destacar que a Formação Santana por

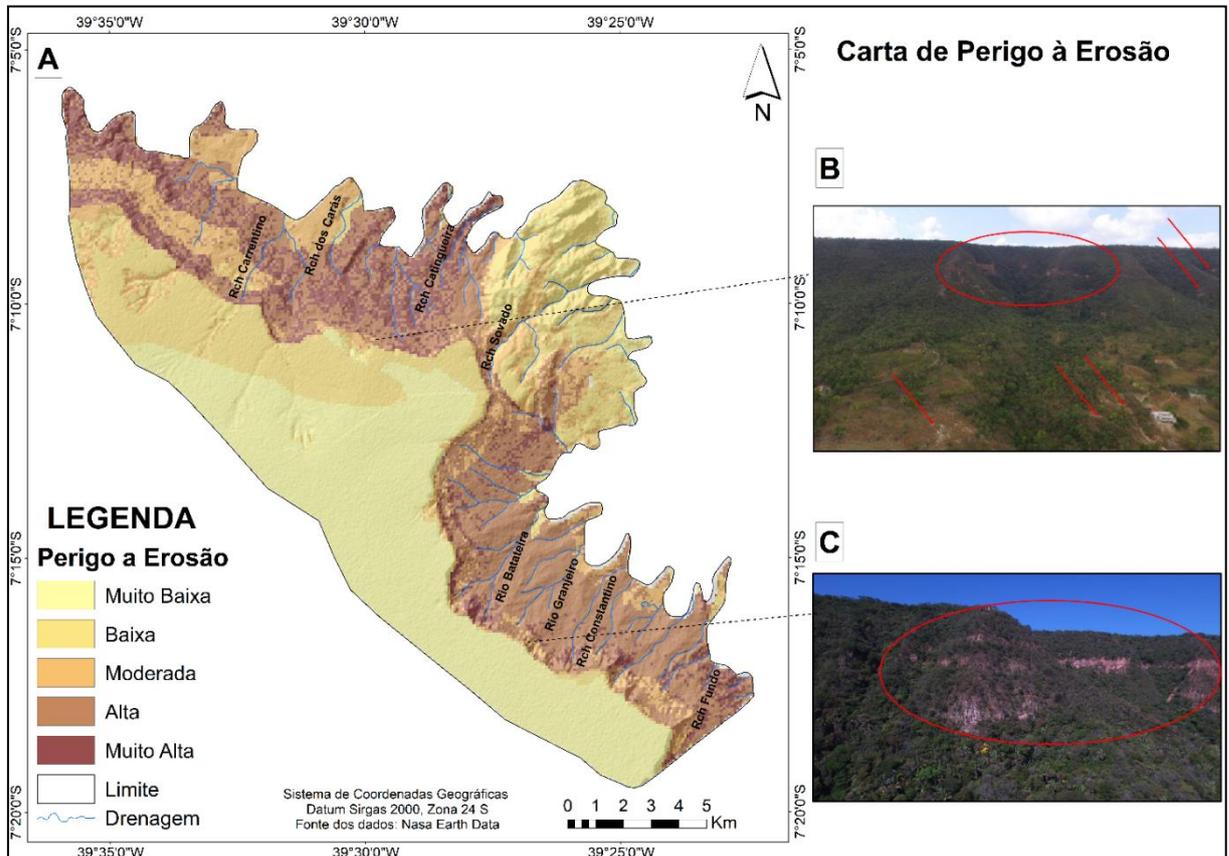
apresentar camada estratigráfica pouco permeável, predominância de camadas de arenitos, siltitos e folhelhos, recebeu um elevado grau de importância na modelagem da carta de perigo à erosão apresentada neste artigo. Vale salientar que o uso indevido do solo como desmatamento, agricultura intensiva, urbanização acelerada, descarte inadequado de resíduos e sobrepastoreio pode acarretar poluição de importantes cursos hídricos que nascem no sopé da Chapada do Araripe.

Xavier e Listo (2020) ao realizar mapeamento de perigo à erosão na zona da mata setentrional pernambucana aplicando métodos multicritérios identificaram que os fatores antrópicos possuem um papel relevante na deflagração dos processos erosivos na área estudada. Aslam *et al.* (2021) acrescentam o manejo inadequado do solo, a remoção da cobertura vegetal e certas propriedades intrínsecas do solo resultam na vulnerabilidade socioambiental das áreas predominantemente agrícolas à erosão do solo. De igual modo, nesta pesquisa o parâmetro uso da terra, especialmente às áreas de plantio e cultivo da terra e a criação de animais tiveram uma influência significativa na espacialização do perigo erosivo.

Em relação ao índice FD foram obtidos os seguintes resultados para as classes de perigo à erosão (Figura 3): Muito Baixa (28%); Baixa (20,5%); Moderada (12,4%); Alta (28,1%); Muito alta (11%). Amparando-se no conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977), em que as unidades ecodinâmicas são classificadas em termos de degradação ou conservação segundo três estágios: “meios estáveis”, “meios intergrades” e “meios fortemente instáveis”.

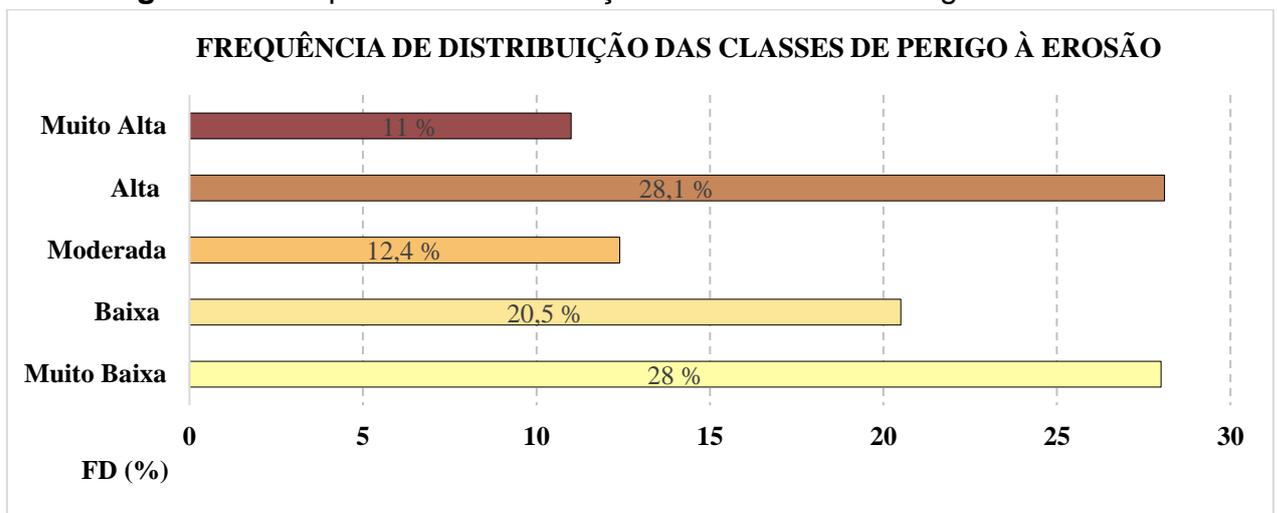
O resultado exportado pela carta de perigo à erosão na face leste da Chapada do Araripe pode ser interpretado da seguinte forma: A união das classes Muito Baixa e Baixa, equivalem a “meios estáveis”, totalizando 48,5% da área estudada. A classe Moderada equivale a “meio intergrades”, representando 12,4% da área; e a junção das classes Alta e Muito alta, equivalente a “meios fortemente instáveis”, totalizando 39,1% da área. A presença significativa de meios fortemente instáveis destaca a necessidade de estratégias de gestão e conservação para evitar a degradação e promover a recuperação dessas regiões.

**Figura 3** – A) Carta de Perigo à Erosão face leste da Chapada do Araripe. B) Círculo destacando feições erosivas na região escarpada e setas indicando feições erosivas no sopé da Chapada do Araripe em classes de perigo a erosão previstas como Alta e Muito Alta. C) Círculo indicando feições erosivas na região escarpada em classe de Perigo à Erosão Muito Alta



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

**Figura 4** – Frequência de Distribuição das classes de Perigo à Erosão.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

## Considerações finais

O emprego de técnicas de geoprocessamento associadas ao modelo AHP e trabalho de campo foram cruciais para a análise ambiental apresentada neste artigo. A carta de Perigo à Erosão da face leste da Chapada do Araripe, permitiu indicar espacialmente as áreas que necessitam de melhor planejamento, com vistas à conservação do solo, as áreas mais críticas apontadas pelo modelo estão localizadas, predominantemente, nas encostas mais declivosas, principalmente na região da escarpa e no seu sopé. A erosão acelerada pode comprometer as nascentes de cursos d'água importantes que irrigam o município do Crato, região do Cariri, cearense, especialmente as bacias hidrográficas do rio Granjeiro e do rio Batateira, situadas na porção sudeste da área estudada.

Conclui-se que a metodologia apresentada foi eficiente para fins de avaliação do perigo à erosão na face leste da Chapada do Araripe, apresentando informações importantes que podem ser utilizadas por gestores públicos e sociedade em geral com vistas a promover o uso sustentável da região avaliada. Futuras pesquisas poderão explorar a aplicação de técnicas de geoprocessamento e o modelo AHP, incluindo mais parâmetros condicionantes permitindo a comparação e a identificação de padrões de perigo à erosão.

## Referências

AGRA, R. M. R. T.; ANDRADE, C. D. Análise Multicritério da Suscetibilidade à Erosão na Bacia Hidrográfica do Rio da Batateira, CE. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia** (Online), v. 73, p. 119-133, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv73n1-50066>.

ASLAM, B., MAQSOOM, A., ALALOUL, W. S., MUSARAT, A. M., JABBAR, T., ZAFAR, A. Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: case of district Chitral, Pakistan. **Ain Shams Eng. J.**, v. 12 n<sup>o</sup>2, 2021, pp. 1637-1649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.015>.

BARBOSA, B. G. S.; BISPO, C. O.; LISTO, F. L. R. Uso e Cobertura da Terra: os parâmetros naturais e antropogênicos na borda oriental da Chapada do Araripe (CE). In: **Anais...** XIII Sinageo Geomorfologia: Complexidade e Interescalaridade da Paisagem. 1ed.São José dos Campos - SP: Comum Design, 2022, v. 1, p. 700-708.

BASTOS, F. H.; PEULVAST, J. Suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa no maciço de Baturité - Ceará, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 124-142, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v2i0.119539>.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8ª ed. São Paulo: Ícone, 2012, 335 p.

CARTWRIGHT, J. H., SHAMMI, S. A.; RODGERS, J. C. Use of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) for Mapping Erosion Potential in Gulf of Mexico Watersheds. **Water**. v. 14(12), 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14121923>.

CARVALHO, C. M.; RIEDEL, P. S. Técnicas de Geoprocessamento aplicadas ao estudo da suscetibilidade a escorregamentos translacionais nos entornos dos polidutos de Cubatão - SP In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, 2005. **Anais...** Goiânia, Brasil, 2005. INPE, p. 2901 - 2908.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ F. P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. 1. ed. São José dos Campos: INPE, 2001. 124p.

FUNCEME. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos - Mesorregião do Sul Cearense**. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Fortaleza, 2012. 280p.

GHOLAMIA, V.; SAHOURB, H.; AMRIC, M. A. H. Soil erosion modeling using erosion pins and artificial neural networks. **Catena**. Vol. 196, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104902>.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos**. 8ª ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, p. 93-148, 2008.

GUERRA A J T. et al. Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. **Pedosphere**. v. 27, p. 27–41, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60294-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60294-7).

GUERRA, M. D. F.; SOUZA; SILVA, E. V. Veredas da Chapada do Araripe: subespaços de exceção no semiárido do estado do Ceará, BR. **Ateliê geográfico (UFG)**, v. 14, p. 51-66, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5216/ag.v14i2.62824>.

GURGEL, S. P. P.; BEZERRA, F. H. R.; CORRÊA, A. C.B.; MARQUES, F O.; MAIA, R. P. Cenozoic uplift and erosion of structural landforms in NE Brazil. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 186, n. 1, p. 68 -84, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.023>.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal do Crato**. Secretaria de Planejamento e Gestão do Ceará, Fortaleza, 2012.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. BITAR, O. Y; FREITAS, C. G. L; FERREIRA, A. L. Classificação de declividade para fins de normalização geotécnica em planejamento urbano. **Anais...** Congresso Brasileiro de Geologia, Santos-SP. 2012.

KIKER, G. A.; BRIDGES, T. S.; VARGHESE, A.; SEAGER, T. P.; LINKOV, I. Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, v. 1, n. 2, p. 95-108, 2005. DOI: [https://doi.org/10.1897/IEAM\\_2004a-015.1](https://doi.org/10.1897/IEAM_2004a-015.1).

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

MORALES, N.; ASSINE, M. L. Chapada Do Araripe: A Highland Oasis Incrusted into the Semi-arid Region of Northeastern Brazil. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. (Orgs.). **Landscapes and Landforms of Brazil**. Dordrecht: Springer, 2015.

PAIVA, L. G. G.; Freitas, L. C. B.; ALMEIDA, R. S.; Veríssimo C. U. V. Condicionantes geológico-geomorfológicos de movimentos de massa em bacias periurbanas na Chapada do Araripe. In: **Anais...** XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE, Florianópolis, 2017.

PEREIRA, L. S.; RODRIGUES, A. M. A importância de serem compreendidos os solos, seus usos e sua conservação na prevenção de riscos socioambientais. In: CARDOSO, C.; SILVA, M. S.; GUERRA, A. J. T. (orgs). **Geografia e riscos socioambientais**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020.

PEULVAST, J. BÉTARD, F.; MAGALHÃES, A. O. Scarp morphology and identification of large-scale mass movements in tropical tablelands: the eastern Araripe basin (Ceará, Brazil). **Geomorphologie**, v. 17, n. 1, p. 33-52, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.8800>.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água**: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. Viçosa: Ed. Viçosa, 2009.

RAFFO, J. G. DA G. O Processo Analítico Hierárquico e seu uso na modelagem do espaço geográfico. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, Volume Esp, p. 26–37, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0002>.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Mcgraw-hill, Makron, 1991. Tradução e Revisão Técnica Wainer da Silveira e Silva.

SAATY, T. L. Relative measurement and Its generalization in decision making why Pairwise comparisons are Central in mathematics for the measurement of intangible factors the Analytic Hierarchy/Network Process. **Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. - RACSM**, v.102, n. 2, p.251–318, 2008.

SELBY, M. J. **Hillslope Materials and Processes**. 2ª.ed Oxford, New York, 2005. 451. P.

TOMINAGA, L.K.; FERREIRA, C.J.; VEDOVELLO, R.; TAVARES, R.; SANTORO, J.; SOUZA, C.R. de G. 2004. Cartas de perigo a escorregamentos e de risco a pessoas e bens do Litoral Norte de São Paulo: conceitos e técnicas. In: **Anais...** PEJON, O.; ZUQUETTE, L. (eds.) Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 5º, São Carlos (SP), 2004, ABGE.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977.

XAVIER, J. P. S.; LISTO, F. L. R. Mapeamento de suscetibilidade e de perigo à erosão e inventário de cicatrizes erosivas na Zona da Mata Setentrional Pernambucana. **GEO UERJ** (2007), p. 1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2020.34265>.

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. **Catena**, v.137, p.256-268, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.004>.

WU, Q.; WANG, M. A framework for risk assessment on soil erosion by water using an integrated and systematic approach. **Journal of Hydrology**, v.337, p.11-21. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.022>.