



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

LETICIA MOREIRA DE CARVALHO

**MAPA DE SUSCETIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE SOLOS  
EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS DO ESTADO DO CEARÁ**

Caruaru

2024

LETICIA MOREIRA DE CARVALHO

**MAPA DE SUSCETIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE SOLOS  
EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS DO ESTADO DO CEARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECAM do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Obras Cíveis e Infraestrutura

**Linha de Pesquisa:** Estudos Geotécnicos

**Orientadora:** Profa. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Caruaru

2024

LETICIA MOREIRA DE CARVALHO

**MAPA DE SUSCETIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE SOLOS  
EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS DO ESTADO DO CEARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECAAM do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Obras Cíveis e Infraestrutura

**Linha de Pesquisa:** Estudos Geotécnicos

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

---

Prof. Dr. Silvio Romero Ferreira de Melo (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

---

Profa. Dra. Ana Patrícia Nunes Bandeira (Examinador Externo)  
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus por me conceder saúde, por me dá forças e determinação para conclusão desta importante etapa da minha vida.

Aos meus pais, Francisco Sérgio Araújo de Carvalho e Maria Lavínia Moreira de Freitas, que sempre acreditaram no meu potencial e me apoiaram pelo caminho da educação e da fé.

Às minhas irmãs, Lidiany Moreira de Carvalho e Laura Moreira de Carvalho pelo companheirismo e paciência de sempre, bem como à minha família, incluindo avós, tios(as), primos (a), amigos (as), padrinho, sogra e ao meu namorado, Lucas Nogueira, por sempre me incentivarem e confiarem na minha capacidade em realizar minhas aspirações, me ajudando de todas as formas possíveis.

À minha orientadora Profa. Dra. Maria Isabela Marques, pela orientação, disponibilidade e contribuição no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos excelentes professores da pós-graduação, que foram fundamentais para o meu aprendizado, em especial ao Prof. Dr. Silvio Romero, que foi minha inspiração para a escolha do tema da pesquisa.

Aos meus colegas de mestrado, Luana Dantas, Luís Eduardo e Alice Costa que mesmo à distância se fizeram presentes e compartilharam comigo dos mesmos objetivos e aprendizados.

Ao PPGECAm de Caruaru, pela oportunidade e por todo suporte ao meu conhecimento e a todos os meus amigos e colegas de trabalho que compreenderam as minhas necessidades e contribuiram, mesmo que indiretamente, para essa conquista.

## RESUMO

O crescimento populacional causa uma conseqüente ocupação do solo nos meios urbanos e rurais, no entanto, a previsão do comportamento do solo tem sido desconsiderada, o que contribui para o surgimento de diversos problemas nas edificações apoiadas em solos de comportamentos especiais. A utilização de mapas geotécnicos tem se tornado cada vez mais comum, pois funciona como uma análise preliminar do solo. Esta pesquisa tem como objetivo produzir o mapa de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis do estado do Ceará, tendo como fatores os condicionantes de Climatologia, Pedologia e Geologia, de modo a compará-lo com 10 pontos de ocorrência disponibilizados pela bibliografia. Foi utilizado o Sistema de Informação Geográfico (SIG) QGIS 3.28, para confeccionar as cartas derivadas de suscetibilidade com base nos mapas fundamentais de Geologia na escala 1:500.000, este fornecido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e de Pedologia na escala 1:250.000, e de Clima na escala 1:500.000, ambos fornecidos pelas Bases Cartográficas Contínuas (IBGE). Aplicando-se o método ponderado, obteve-se o mapa de suscetibilidade de solos expansivos e colapsíveis do Estado do Ceará. Como resultado das cartas derivadas, a área da Geologia apresentou predominância de suscetibilidade média para solos expansivos (45,45%) e alta para suscetibilidade ao colapso (38,67%). Para a Pedologia, a predominância foi de baixa suscetibilidade para solos expansivos (63,56%) e de baixa suscetibilidade ao colapso (54,57%). Para o Clima, foi verificado baixa (52,18%) e alta (47,82%) suscetibilidade à expansão e colapso, respectivamente. Na carta interpretativa Pedologia/Geologia destaca-se média para suscetibilidade à expansão (56,99%) e média para colapso (61,76%). Na carta interpretativa resultante Pedologia/Geologia/Clima verificou-se suscetibilidade baixa (36,34%), média (61,67%) e alta (1,98%) para expansão e suscetibilidade baixa (23,08%), média (76,47%) e alta (0,4%) para colapso. Ao comparar os resultados obtidos na carta interpretativa resultante com os casos reportados na literatura o solo da cidade de Icó confirma a suscetibilidade à expansão, o solo da cidade de Russas diverge do resultado obtido na carta. Para o comportamento de colapso, os solos das cidades de Icó e Missão Velha apresentaram convergências entre dados de estudos anteriores e a carta interpretativa. As áreas que apresentam solos suscetíveis ao comportamento de colapso são maiores que as áreas que apresentam solos de comportamento expansivo, assim como o quantitativo de estudos realizados sobre esses solos. Os resultados obtidos nesta pesquisa contribuem para o planejamento urbano e implantação de obras civis no estado do Ceará

**Palavras chaves:** Solo; Georreferenciamento; Suscetibilidade; Expansão; Colapso.

## ABSTRACT

Population growth causes a consequent occupation of the land in urban and rural areas, however, the prediction of soil behavior has been disregarded, which contributes to the emergence of several problems in buildings supported by soils with special behaviors. The use of geotechnical maps has become increasingly common, as it works as a preliminary analysis of the soil. This research aims to produce the map of susceptibility to the occurrence of expansive and collapsible soils in the state of Ceará, having as parameters the conditioning factors of Climatology, Pedology and Geology, in order to compare it with 10 points of occurrence made available by the bibliography. The Geographic Information System (GIS) QGIS 3.28 was used to prepare the derived maps of susceptibility based on the fundamental maps of Geology on a scale of 1:500.000, this one provided by the Geological Service of Brazil (CPRM) and of Pedology on a scale of 1:250.000 and Climate on a scale of 1:500.000, both provided by the Continuous Cartographic Bases (IBGE). Applying the weighted method, the susceptibility map of expansive and collapsible soils in the State of Ceará was obtained, and the points of occurrence of these soils found in bibliographic research were added. As a result of the derived charts, Geology showed a predominance of medium susceptibility for expansive soils (45.45%) and high susceptibility to collapse (38.67%). For Pedology, the predominance was of low susceptibility to expansive soils (63.56%) and low susceptibility to collapse (54.57%). For Climate, low (52.18%) and high (47.82%) susceptibility to expansion and collapse were verified, respectively. In the interpretative chart Pedology/Geology, the average for susceptibility to expansion (56.99%) and medium for collapse (61.76%) stand out. In the resulting interpretative chart Pedology/Geology/Climate, low (34.80%), medium (35.45%) and high (29.75%) susceptibility to expansion and low (21.79%), medium (72.44%) and high (5.84%) susceptibility to collapse were verified. By comparing the results obtained in the resulting interpretative letter with the cases reported in the literature, the city of Icó confirms the susceptibility to expansion, the city of Russas diverges from the result obtained in the letter. For the collapse, Icó and Missão Velha had concordant results with susceptibility to collapse on the maps. The number of occurrences, as well as studies, on collapsible soils in Ceará is higher than for expansive soils. The results obtained in this research contribute to the urban planning and implementation of civil works in the state of Ceará

**Palavras chaves:** Georeferencing; Expansion; Collapse.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema estrutural da montmorilonita.....	18
Figura 2: Patologias resultantes de construções sobre solos colapsíveis.....	24
Figura 3: Proporção de ocorrências no BANDASE para 526 amostras do Brasil.....	25
Figura 4: Principais tipos de projeções cartográficas.....	33
Figura 5: Carta de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis de Petrolina – PE.....	36
Figura 6: Carta de suscetibilidade à ocorrência de solos expansivos de Petrolina – PE.....	36
Figura 7: Mapa pedológico (a) e Mapa de suscetibilidade dos Solos da cidade de Pombos, Pernambuco, Brasil: (b) expansão; (c) colapso; (d) dispersão; (e) erosão; (f) solos moles.....	38
Figura 8: Mapa pedológico do Estado do Ceará quanto à susceptibilidade à expansão.....	39
Figura 9: Mapa pedológico do Estado do Ceará quanto à susceptibilidade ao colapso.....	40
Figura 10: Mapa de Localização Geográfica do Ceará.....	42
Figura 11: Mesorregiões do estado do Ceará.....	43
Figura 12: Microrregiões do estado do Ceará.....	44
Figura 13: Fases para confecção de mapas de suscetibilidade.....	45
Figura 14: Matriz pedológica de suscetibilidade aos problemas geotécnicos.....	48
Figura 15: Pesquisa Geral de Poços e Fontes Naturais do Serviço Geológico do Brasil.....	49
Figura 16: Aspectos geológicos do posto pesquisado.....	49
Figura 17: Correlação entre tipologia climática, índice de umidade de THORNTHWAITE & MATHER (1955) e os graus adotados.....	51
Figura 18: Tabela de atributos com coluna de expansão e colapso.....	51
Figura 19: Valores de suscetibilidade ao colapso categorizado por cores.....	51
Figura 20: Impressão das cartas derivadas.....	52
Figura 21: Suscetibilidade através do cruzamento da Pedologia, Geologia e Climatologia pelo critério ponderado através da Calculadora Raster.....	53
Figura 22: Mapa Geológico do estado do Ceará.....	56
Figura 23: Metodologia empregada na elaboração das Cartas Derivadas da Geologia.....	57
Figura 24: Mapa Pedológico do estado do Ceará.....	58
Figura 25: Metodologia empregada na elaboração das Cartas Derivadas de Pedologia.....	59
Figura 26: Mapa de Clima do Ceará pela classificação de Thornthwaite e Mather.....	60
Figura 27: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos com base na Geologia do Ceará.....	63
Figura 28: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis com base na Geologia do Ceará.....	64
Figura 29: Graus de suscetibilidade à expansão com base na Geologia.....	65
Figura 30: Graus de suscetibilidade ao colapso com base na Geologia.....	65
Figura 31: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos com base na Pedologia do Ceará.....	66

Figura 32: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis com base na Pedologia do Ceará.....	67
Figura 33: Grau de suscetibilidade à expansão com base na Pedologia.....	68
Figura 34: Grau de suscetibilidade ao colapso com base na Pedologia.....	68
Figura 35: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis com base no Clima do Ceará.....	69
Figura 36: Grau de suscetibilidade à expansão e ao colapso com base no Clima.....	70
Figura 37: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos do Ceará (Pedologia e Geologia) .....	71
Figura 38: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis do Ceará (Pedologia e Geologia) .....	72
Figura 39: Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos do Ceará em porcentagem (Pedologia e Geologia) .....	73
Figura 40: Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis do Ceará em porcentagem (Pedologia e Geologia) .....	73
Figura 41: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos do Ceará (Pedologia, Geologia e Clima) .....	74
Figura 42: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis do Ceará (Pedologia, Geologia e Clima) .....	75
Figura 43: Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos do Ceará em porcentagem (Pedologia, Geologia e Clima) .....	76
Figura 44: Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis do Ceará em porcentagem (Pedologia, Geologia e Clima) .....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Graus de suscetibilidade, peso e descrição.....	47
Tabela 2: Suscetibilidade à expansão e ao colapso com relação à Geologia.....	49
Tabela 3: Suscetibilidade à expansão com relação à Geologia.....	49
Tabela 4: Suscetibilidade ao colapso com relação à Geologia.....	49
Tabela 5: Graus de Suscetibilidade à expansão e ao colapso para a classificação de Thornthwaite e Mather para o Ceará.....	51
Tabela 6: Suscetibilidade final.....	54
Tabela 7: Suscetibilidade à expansão e ao colapso com base na litologia e mineralogia do Ceará.....	62
Tabela 8: Resumo das áreas de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis do Ceará.....	77
Tabela 9: Ocorrências de Solos Expansivos e Colapsíveis (Bibliografia versus Carta Interpretativa).....	80

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Métodos de Identificação de Solos Expansivos.....	21
Quadro 2: Métodos de Identificação de Solos Colapsíveis.....	23
Quadro 3: Estudos realizados sobre a ocorrência de solos colapsíveis e expansivos no estado do Ceará.....	28
Quadro 4: Tipos de projeções e aplicações.....	34
Quadro 5: Bases de dados e escalas das condicionantes utilizadas.....	46

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Objetivos</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Justificativa</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Estrutura da dissertação</b>	<b>17</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Solos Expansivos</b>	<b>18</b>
192.1.2 Problemas causados por Solos Expansivos	20
<b>2.2 Solos Colapsíveis</b>	<b>20</b>
212.2.2 Problemas causados por Solos Colapsíveis	22
<b>2.3 Estudos sobre solos expansivos e colapsíveis no Ceará</b>	<b>24</b>
<b>2.4 Cartografia Geotécnica</b>	<b>29</b>
<b>2.5 Mapa de Suscetibilidade</b>	<b>33</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>41</b>
<b>3.1 Caracterização do estado do Ceará</b>	<b>41</b>
<b>3.2 Metodologia</b>	<b>44</b>
453.2.1.1 Fase 1: Aquisição através de bases cartográficas	45
3.2.1.2 Fase 2: Suscetibilidade à ocorrência à expansão e ao colapso	45
3.2.1.3 Fase 3: Confeção das Cartas Derivadas	50
3.2.1.4 Fase 4: Cruzamento das condicionantes: Pedologia, Geologia e Climatologia	52
3.2.2 Confeção de Cartas de suscetibilidade	53
3.2.2.1 Geologia	53
3.2.2.2 Pedologia	54
3.2.2.3 Climatologia	58
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>60</b>
<b>4.1 Cartas derivadas de Suscetibilidade à Ocorrência de Solos Expansivos e Colapsíveis</b>	<b>60</b>
4.1.1 Base Geológica	60
4.1.2 Base Pedológica	64
4.1.3 Base Climatológica (Classificação de Thornthwaite e Mather)	68
<b>4.2 Cartas interpretativas de Suscetibilidade à Ocorrência de Solos Expansivos e Colapsíveis</b>	<b>69</b>
4.2.1 Bases Pedológica e Geológica	69
4.2.2 Bases Geológica, Pedológica e Climatológica	72
<b>4.3 Pontos de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis no Ceará</b>	<b>77</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>80</b>
<b>5.1. Percentuais de solos da superfície Ceará a partir da cartas interpretativas</b>	<b>80</b>

	12
<b>5.2. Comparação dos resultados do mapeamento com pontos de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis no Ceará</b>	<b>81</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>93</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Solos não saturados são aqueles em que os poros não estão completamente preenchidos por líquidos (normalmente a água), e/ou gases (normalmente o ar). Esses solos apresentam uma variação de saturação que é ocasionada pela alteração do teor de umidade, conseqüentemente, causando a instabilidade volumétrica e podendo vir a expandir ou colapsar, influenciando no seu volume e na sua resistência (CHAGAS; MOURA; CARNEIRO, 2016).

Na prática da engenharia geotécnica, solos expansivos submetidos a baixos níveis de tensões podem apresentar uma elevação diferencial significativa e, solos colapsíveis submetidos a tensões mais elevadas, com baixo teor de umidade, podem causar sérios danos nas estruturas devido ao comportamento de colapso (ASHAYERI; YASREBI, 2009; ATAÍDE, 2017; VALLEJO; FERRER, 2002).

Com relação à ocorrência de solos expansivos no mundo, Ferreira (1995) ressalta que além dos Estados Unidos (EUA), Reino Unido e Espanha, este tipo de solo também pode ser encontrado em países como Gana, Canadá, Angola, Zíbia, Etiópia, Kênia, Nigéria, África do Sul, Peru, Tanzânia, Argentina, Venezuela, Austrália, China, Índia, Romênia, Israel, Jordânia e Arábia Saudita. Já em relação a ocorrência de solos colapsíveis, o referido autor ressalta a presença desse tipo de solo na China, França, Países Baixos, Uruguai, Alemanha, Sibéria e Nova Zelândia.

No Brasil, são identificados solos expansivos nas regiões Sul, Centro Sul, Centro Oeste, Norte e Nordeste (SOBRAL, 1956; SIMMES *et al.*, 1981; COSTA *et al.*, 1982; VARGAS, 1985; FERREIRA, 2008). Em relação à ocorrência de solos colapsíveis no Brasil, pode-se citar as regiões do Centro-sul, Nordeste e grande parte do Sudeste. Ressalta-se que na região Sudeste concentra-se o maior número de estudos, tais como Mendonça, (1990), Ferreira *et al.* (1991), Andrade (2005) e Futai e Suzuki (2010). No Ceará, alguns estudos indicam a ocorrência de solos colapsíveis e expansivos, a exemplo de Neto (2013); Barbosa (2015), Chagas, Moura e Carneiro (2016), Bandeira (2020) e Batista (2021).

Segundo a *New York State Division of Homeland Security and Emergency Services* (NYS DHSES, 2014), estima-se que os EUA tenham custo de aproximadamente US\$ 300 milhões/ano em decorrência dos danos causados pela expansão dos solos. Na Espanha o custo mínimo com a recuperação dos danos causados por esse tipo de solo é de aproximadamente 1 bilhão de pesetas/ano (AYALA *et*

*al.*,1986). Em relação aos danos causados pela ocorrência de solos colapsíveis, Lawton, Fragaszy e Hetherington (1992) estimaram danos com infraestrutura e litígios causados pelos solos colapsíveis, em torno de US\$100 milhões para a região sul da Califórnia. Jefferson *et al.* (2005) informam que, na Bulgária, considerando as últimas décadas, os danos são superiores a US\$100 milhões.

No Brasil, não se tem estimativas em relação ao custo dos danos causados pela ocorrência de solos expansivos e/ou colapsíveis, não obstante, os danos foram identificados em diversos estados, tais como: Paraná, Bahia, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul (VASCONCELOS, 2001; OLIVEIRA; JESUS; MIRANDA, 2006). Na região Nordeste também foram observados danos devido à presença de solos expansivos, conforme apresentados nos trabalhos de Ferreira (1988) e Cavalcante *et al.* (2006) e colapsíveis, como constatado por Aragão e Melo (1982) e Marinho (2018).

Considerando esse comportamento de variação de volume de solos expansivos e colapsíveis, a investigação geotécnica é de suma importância para a prevenção de danos às estruturas e fundações, de modo a quantificar e prever a grandeza do colapso que poderá ocorrer (BORGES; FERREIRA; AMORIM, 2023).

Uma carta geotécnica expõe as limitações e as potencialidades dos terrenos e definem diretrizes de ocupação para um ou vários tipos de uso do solo, e a carta de suscetibilidade apresenta gradações de probabilidade de desencadeamento de um ou mais fenômenos naturais ou induzidos pela ocupação (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998). A cartografia geotécnica, ao disponibilizar informações referentes aos fenômenos associados à superfície terrestre, constitui-se um importante instrumento de planejamento, gestão e implantação de obras civis, principalmente na fase de pré-projeto (GOMES; MARQUES; FRANCO, 2017; HOLANDA, 2022).

Nesta perspectiva, os mapas de susceptibilidade surgem como um instrumento importante na identificação e orientação sobre o uso do solo de um dado local, como os produzidos e apresentados nos trabalhos de Vasconcelos (2001), Oliveira (2002), Silva e Ferreira (2003), Amorim (2004), Aquino e Ferreira (2022), Tavares *et al.* (2022), Santos *et al.* (2021), dentre outros.

Oliveira (2002) elaborou uma carta de zoneamento de risco de solos colapsíveis na área urbana de Ilha Solteira/SP, com base em informações de obras de infraestrutura urbana de rede de água e esgoto. Silva e Ferreira (2003) elaboraram cartas de suscetibilidade ao colapso e à expansão, devido à inundação em solos, do município de Petrolina/PE e Amorim (2004), a partir dos Mapas Fundamentais - climatológicos,

pedológicos e geológicos, elaborou as “Cartas Interpretativas” de colapso e expansão de Pernambuco. Christ (2014) elaborou mapas de suscetibilidade ao colapso voltados a região da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição no Estado de Santa Catarina.

Aquino e Ferreira (2022) elaboraram cartas interpretativas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos de Teresina/PI, por meio de levantamentos climatológicos, geológicos e pedológicos. Tavares *et al.* (2022) elaboraram cartas de suscetibilidade a colapso e expansão dos solos do estado do Ceará, a partir das características das classes pedológicas, classificando-as em alta, média ou baixa suscetibilidade.

Santos *et al.* (2021) apresentaram mapas derivados da pedologia, a partir do “Mapa Exploratório – Reconhecimento dos Solos do Estado de Sergipe, 1973” para classificar os solos do referido local quanto a suscetibilidade (alta, média e baixa) à ocorrência de colapso e expansão. Recentemente, Holanda (2022) utilizou Redes Neurais Artificiais (RNA) para classificar a suscetibilidade do solo através do valor da probabilidade de ocorrência de solo colapsível ou expansivo para todo o Brasil.

Esta pesquisa apresenta uma carta de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis do estado do Ceará, elaborado com base em três condicionantes: Pedologia, Geologia e Climatologia, em que através do software QGIS, foram confeccionadas as cartas derivadas de suscetibilidade de cada condicionante e em seguida por meio do método ponderado elaborou-se a carta interpretativa final de Suscetibilidade à ocorrência de Solos Expansivos e Colapsíveis do estado do Ceará. Estudos locais reportados na literatura, em que foram detectados a presença de solos expansivos e colapsíveis por ensaios de laboratório e campo foram inseridos na carta de suscetibilidade de ocorrência para comparação de resultados.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Produzir mapas de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis no estado do Ceará, tendo como fatores condicionantes de Climatologia, Pedologia e Geologia.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar informações atualizadas referentes à Pedologia, Geologia e Climatologia do estado do Ceará;
- Eleger critérios climáticos, pedológicos, e geológicos a serem adotados para identificar as áreas potencialmente favoráveis à expansão e colapso, assim como os graus de suscetibilidade baseados nas pesquisas de Amorim (2004) e Aquino (2020);
- Aplicar o método ponderado para a elaboração do mapa de suscetibilidade de ocorrência.
- Elaborar as cartas interpretativas de expansão e colapso para (Pedologia e Geologia) e (Pedologia, Geologia e Clima);
- Coletar dados de locais com solos expansivos e colapsíveis, estudados na literatura e inseri-los no mapa de suscetibilidade de ocorrência;
- Comparar os resultados da classificação de ocorrência no mapa de suscetibilidade com as características dos solos dos locais usados como referência.

## 1.2 Justificativa

Nos últimos anos no Brasil, os estudos acerca de solos expansivos e colapsíveis vêm se destacando, sobretudo na região Nordeste, tendo em vista que este tipo de solo acarreta diversos problemas e danos às estruturas sobre eles assentadas.

No Ceará, em particular, esse assunto demanda mais estudos, devido aos solos com essas características serem predominantemente encontrados em regiões áridas e semiáridas, e serem empregados nas construções de aterros e barragens, o que pode gerar ondulações e rupturas nos pavimentos, bem como trincas ou fissuras nas estruturas das barragens, dentre outros problemas. Nesta perspectiva, é de suma importância conhecer as características desses solos, de modo a prevenir problemas futuros, além de garantir maior segurança e estabilidade à construção. Entretanto, na falta de investigação adequada e suficiente, os mapas de suscetibilidade surgem como uma importante ferramenta de identificação e orientação.

Dada essa problemática, esta pesquisa se justifica pela necessidade de mapear os locais suscetíveis a presença de solos potencialmente expansivos e colapsíveis,

preenchendo uma lacuna local neste tema, e contribuindo para o planejamento e implantação de obras civis no estado do Ceará, principalmente na fase de pré-projeto.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

No Capítulo 1 são apresentados a introdução, expondo a relevância da pesquisa, os objetos gerais e específicos, a justificativa e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 é apresentado o estudo bibliográfico, com todas as informações necessárias ao desenvolvimento desta pesquisa, contemplando os assuntos: (a) expansão e colapso do solo; (b) cartografia geotécnica; (c) Sistema de Informação Geográfico (SIG) e (d) mapas de suscetibilidade.

O Capítulo 3 é composto pelos materiais e métodos (caracterização do estado do Ceará, cartas de suscetibilidade dos solos).

No Capítulo 4 encontram-se os resultados desta pesquisa, mostrando as cartas de suscetibilidade que foram confeccionadas e os pontos de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis no Ceará.

No Capítulo 5 estão as conclusões da pesquisa quanto aos percentuais de solos da superfície do Ceará, a partir das cartas interpretativas e a comparação dos resultados do mapeamento com pontos de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis, além de sugestões para futuras pesquisas.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

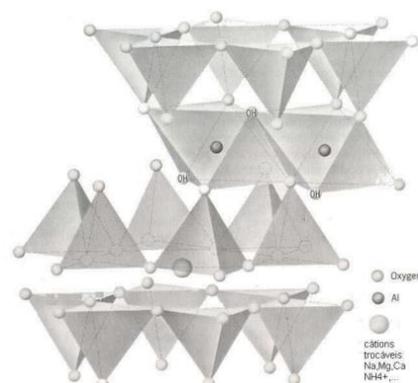
É apresentada a revisão da literatura sobre o tema abordado, com todas as informações necessárias ao desenvolvimento desta pesquisa, contemplando os diversos aspectos inerentes aos solos expansivos, solos colapsíveis, melhoramento dos referidos tipos de solos, bem como cartografia geotécnica e mapa de suscetibilidade.

### 2.1 Solos Expansivos

Segundo Ayala (1986), um solo expansivo é um solo instável ou metaestável. Por variar de acordo com a época do ano, apresenta comportamento sazonal. Em períodos de estiagem ele tende a se enrijecer ao mesmo tempo que se contrai, enquanto em épocas chuvosas ele se expande, aumentando os vazios entre as suas partículas. O termo expansividade é geralmente utilizado para definir a propriedade do solo experimentar variações de volume ao serem alteradas suas condições de umidade, ou quando gera pressões se esta variação é impedida.

De acordo com Pinto (2006) a expansibilidade de uma argila está muito ligada aos tipos de minerais presentes nela. Os argilominerais são compostos por estruturas tetraédricas ( $\text{SiO}_2$ ) composta por átomos de silício e outra de octaedros onde átomos de alumínio são circundados por oxigênio ou hidroxilas  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ . Os tipos mais comuns de argilominerais são Illita, Caulinita e Montmorilonita, sendo este último mais propício à expansão pois as moléculas de água se encaixam entre as estruturas tetraédricas tornando-se o arranjo mais frágil, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Esquema estrutural da montmorilonita



Fonte: Grim (1962).

Pinto (2006) descreve que nas Caulinitas, acontece a ligação de uma camada octaédrica (alumínio) com outra tetraédrica (silício), acontecendo ligações de hidrogênio. Essas ligações são fortes o que impede a separação entre as moléculas por moléculas de água, ocorrendo ligação covalente. Nas ilitas, o arranjo é composto por duas camadas tetraédricas (sílicas) com uma octaédrica (alumínio). As ligações entre as camadas ocorrem por íons  $O^{2-}$  e  $O^{2+}$  dos arranjos tetraédricos, que são mais fracos do que as ligações entre camadas de caulinita. Aparecem então imperfeições na composição das argilas o que as tornam ainda mais complexas. Ocorrem substituições isomorfas nos argilominerais onde um átomo de alumínio ( $Al^{3+}$ ) substitui um átomo de silício ( $Si^{4+}$ ) não havendo alteração no arranjo dos átomos, porém alterando a carga elétrica. Como ocorrem essas substituições isomórficas no tetraedro de sílica, ficam partículas com cargas negativas e, Íons de potássio ( $K^+$ ) presentes nas ilitas se ligam as lâminas tetraédricas. Com isso, esses íons de  $K^+$  impedem a expansão destas na presença de água. No caso das Montmorilonitas, estas apresentam estrutura semelhante as ilitas, a diferença é que agora as substituições isomórficas acontecem no octaedro de Alumínio, substituindo o  $Al^{3+}$  por Ferro  $Fe^{+2}$  ou Magnésio  $Mg^{+2}$ ; mas, íons de Cálcio ( $Ca^+$ ) e Sódio ( $Na^+$ ) podem estar dissolvidos em água e ser atraídos para as camadas entre as lâminas de sílica. As argilas do tipo montmorilonitas são muito expansíveis em contato com a água.

#### 2.1.1 Identificação Geotécnica de Solos Expansivos

De acordo com Carvalho (2015), a fase de identificação de solos expansivos é de extrema importância para garantir o sucesso de uma obra de engenharia, visto que em casos de falhas nesta fase, pode haver a necessidade de convívio, tratamento ou até mesmo a demolição desta obra.

Segundo Holanda (2022), pode-se considerar duas maneiras de identificação da expansividade do solo, a primeira é uma pesquisa no local, averiguando fatores como topografia, vegetação, sinais de contração no solo, fissuras nas edificações e informações com os moradores da região. Já a segunda é fazer a interpretação dos ensaios de laboratório resultantes dos métodos de identificação, que podem ser na forma de ensaios mineralógicos, métodos diretos e indiretos.

Os métodos indiretos são aqueles que fornecem indicativos de expansividade a partir de índices físicos, propriedades plásticas, composição granulométrica,

identificação mineralógica, dentre outros. Os ensaios mais utilizados são Difração de Raio-X, Análise Térmica Diferencial (ATD), Adsorção de Azul de Metileno, Análise Térmica Gravimétrica (ATG), Capacidade de Troca de Cátions (CTC), Microscopia Eletrônica, dentre outros. Já os métodos diretos são aqueles que fornecem resultados quantitativos, com base na tensão induzida do solo ou na tensão necessária para impedir que o solo se expanda. Este determina, portanto, as características de mudança de volume dos solos expansivos. Sendo assim, nos ensaios realizados neste método são medidas as variações de volume, sujeitos ou não a sobrecargas. São característicos dos métodos diretos, ensaios de expansão livre e tensão de expansão, sendo realizados também ensaios edométricos que buscam reproduzir em laboratório as condições de campo (ATAIDE, 2017; HOLANDA, 2022; PAIVA, 2016; SILVA, 2022;). No Quadro 1 estão apresentados os métodos de identificação.

### 2.1.2 Problemas causados por Solos Expansivos

De acordo com Oliveira Júnior *et. al.* (2019), nas edificações construídas em solos expansivos, podem ocorrer fissuras nas edificações, ondulações e rupturas nos pavimentos, fissuras generalizadas longitudinais e transversais junto a bueiros etc.

A Sociedade Americana de Engenharia Civil dos EUA estima que uma em cada quatro edificações apresentam danos causados por solos expansivos. Em um ano, solos expansivos podem causar maior perda financeira para os proprietários do que danos causados por tremores de terra, inundações, tornados e furacões combinados. Em relação ao Brasil, não se tem dados específicos quanto aos custos com danos causados por solos expansivos, quando ocorre mudança de umidade.

## 2.2 Solos Colapsíveis

Os solos colapsíveis são estruturalmente instáveis e apresentam redução dos índices de vazios no comportamento tensão – deformação em resposta ao incremento de saturação, sem mudança do estado de tensão devido aos carregamentos externos atuantes. Ou seja, são “[...] designados de verdadeiramente colapsíveis quando experimentam o fenômeno de redução de volume por umedecimento sob peso próprio e condicionalmente colapsíveis quando a redução de volume se processa sob a ação de uma sobrecarga adicional.” Eles apresentam uma estrutura com elevado índice de vazios

mantido pela sucção do solo, partículas secas de argila e silte, além de uma cimentação natural (LOLLO,2008; VILAR; FERREIRA, 2023). Esses solos possuem uma estrutura macroporosa onde as partículas mantêm um arranjo estrutural metaestável devido a tensão capilar, forças eletromagnéticas de superfície, vínculos de silte, argila e outros cimentantes como óxido de ferro, carbonatos e sais solúveis (AMORIM, 2004; FERREIRA, 1995).

Quadro 1: Métodos de Identificação de Solos Expansivos

Métodos	Subdivisões	Critério	Referências
INDIRETOS	Identificativos	Difração e Raio - X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termo-diferencial e Adsorção de etilenoglicol e glicerina	Ayala et. al (1986)
		Físico-Químico	Fink et. al (1971)
	Orientativos	Geologia, Geomorfologia, Pedologia e identificação visual	Patrick e Snethen (1976); Carcedo <i>et al.</i> (1986); Ferreira (1990 e 1993).
	Qualitativos	Granulometria, Consistência e Índices Físicos e Classificação Geotécnica	Prikloński (1952); Skempton (1953); Seed <i>et al.</i> (1962); Van Der Merwe (1964); Chen (1965); Cuellar (1978); Vijayverviya e Ghazzaly (1973); Rodríguez Ortiz (1975)
DIRETOS	Avaliativos	Ensaio de Expansão de Lambe	Lambe (1960)
	Quantitativos	Ensaio de expansão livre e pressão de expansão. Ensaios edométricos simples e duplos.	Seed <i>et al.</i> (1960); Chen (1965) Vijayverviya e Ghazzaly, (1973); Rodríguez Ortiz (1975); Cuellar (1978); Jimenez Salas (1980).
		Ensaio edométricos com sucção controlada	Escario (1967 e 1969); Aitchison <i>et al.</i> (1974); Johnson (1978); Mc Keen, (1980).

Fonte: Modificado de Ferreira (1995) [Atualizar](#)

Comentado [LM1]: FORMATAR

### 2.2.1 Identificação Geotécnica de Solos Colapsíveis

A partir dos limites de consistência e de ensaios edométricos com inundação de corpo de prova pode-se definir critérios para identificação do comportamento colapsível dos solos. Estes critérios e ensaios permitem o estudo de parâmetros específicos em laboratório (como a composição química e o arranjo estrutural) e a suscetibilidade ao colapso com a finalidade de contribuir na caracterização do colapso com ensaios que tratam condições controladas. Enquanto no campo possibilita estimar o potencial de colapso em escala real, dispondo o solo a umidade natural e aos efeitos de saturação. (FREITAS, 2016; HOLANDA, 2022).

Vilar e Ferreira (2023) citam critérios disponíveis para a identificação de solos colapsíveis: critérios “regionais” executados em certas ocorrências de solos ou regiões, a partir de conceitos empíricos ou de determinados testes rápidos; critérios baseados nos limites de consistência ou nas condições de compacidade do solo natural. Outros critérios empregam ensaios edométricos simples e duplos ou ensaios *in situ*, como o expansocolapsômetro, equipamento desenvolvido especialmente para essa finalidade.

Existem duas formas de identificação dos solos colapsíveis que abordam os critérios citados: métodos diretos e métodos indiretos apresentados no Quadro 2. De acordo com Xavier (2018) os métodos indiretos permitem identificar a potencialidade do solo ao colapso, enquanto os métodos diretos são baseados na medida do potencial de colapso.

### 2.2.2 Problemas causados por Solos Colapsíveis

Segundo Machado (1998), a magnitude do colapso apresentado pelo solo dependerá de fatores, tais como umidade inicial, histórico de tensões, espessura da camada de solo envolvida, variação de umidade de solo (devido a infiltração ou elevação do lençol freático) e da sobrecarga imposta.

De acordo com Chagas, Moura e Carneiro (2016), há uma relação entre a ocorrência de solos colapsíveis em locais onde ocorre uma evapotranspiração superior a precipitação, ainda que tenha havido a constatação desses tipos de solos em outras regiões de maior pluviosidade. No entanto, mesmo havendo a presença de minerais estáveis em água quanto à expansão, a exemplo da caulinita e do quartzo, nos solos colapsíveis a condição de colapsividade é favorecida quando tais minerais ou agregados

de minerais são ligados por compostos químicos solúveis, como os sais e outros ligantes, uma vez que criam uma estrutura instável e porosa (GITIRANA JUNIOR *et al.*, 2012).

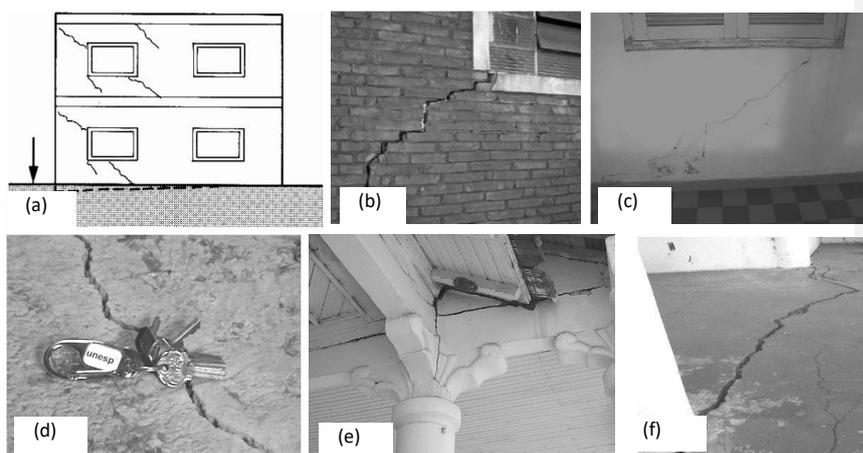
Quadro 2: Métodos de Identificação de Solos Colapsíveis

Métodos	Subdivisões	Critério	Referências
<b>INDIRETOS</b>	Identificativos	Microscopia eletrônica de varredura	Collins e McCown (1974), Wolle <i>et al.</i> (1978), Derbyshire e Mellors (1988).
	Orientativos	Pedologia e Ensaios Expeditos	Ferreira (1990), Ferreira (1993), Arman e Thornton (1972), Jennings e Knight (1975).
	Qualitativos	Índices Físicos	Denisov (1951), Priklonskij (1952), Gibbs e Bara (1962 e 1967), Feda (1966), Kassif e Henkin (1967), Design of Smal Dams (1960 e 1974)
		Ensaios de campo – cone	Código de Obras da URSS (1977)
		Ensaios SPT - T	Décourt e Quaresma Filho (1944)
<b>DIRETOS</b>	Avaliativos	Ensaios Edométricos Duplos	Reginatto e Ferrero (1973)
	Quantitativos	Ensaio edométricos simples	Bally <i>et al.</i> (1973), Jennings e Knight (1975), Vargas (1978), Lutenegeger e Saber (1988)
		Ensaios de campo - Expansocolapsômetro	Ferreira e Lacerda (1993)

Fonte: Adaptado por Mendonça Neto (2011) e Ferreira (2008); modificado de Holanda (2022)

Esse comportamento se caracteriza por ser muito rápido e propício a sérios danos em construções, especialmente as de pequeno porte. Tais danos são mais comuns em solos expansivos (TEIXEIRA, 1998). Na Figura 2 são apresentadas algumas patologias causadas pela presença de solos colapsíveis.

Figura 2: Patologias causadas pela presença de solos colapsíveis.



(a) Formação de trincas por recalque de fundação (b) Rachadura em alvenaria provocada por recalque do solo abaixo da edificação (c) Trinca em parede de alvenaria de tijolos maciços (d) Trinca em laje de concreto (e) Trinca em elemento estrutural de pequena edificação (f) rachadura em piso

Fonte: Lollo (2008).

### 2.3 Estudos sobre solos expansivos e colapsíveis no Ceará

Holanda (2022) apresentou a atualização do BANDASE (FERREIRA, 1990) do Grupo de Pesquisa de Solos Não-Saturados (GNsat) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), que passou a contar com 526 amostras de solos colapsíveis e expansivos, das 5 regiões do Brasil (Figura 3).

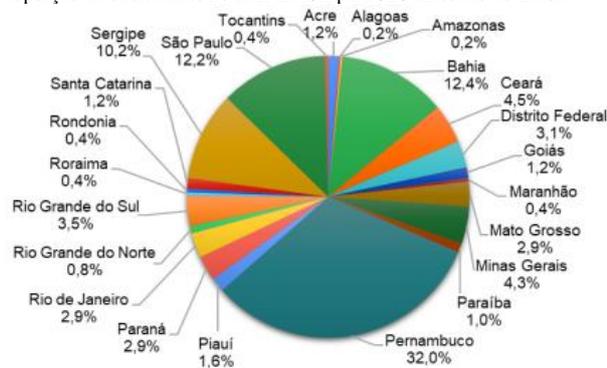
O estado do Ceará apresenta-se, portanto, como o quinto estado do país com a maior ocorrência desses tipos de solos. Holanda (2022) comenta que a maior concentração de dados nas regiões do Nordeste e Sudeste, ocorre devido a uma maior quantidade de pesquisas em universidades, sobre esses comportamentos dos solos

No Ceará, estudos indicam a ocorrência de solos colapsíveis e expansivos, nos municípios de Quixadá, Juazeiro do Norte, Missão Velha, Icó, Barbalha, Crato, Russas e Santana do Cariri conforme os trabalhos de Neto (2013), Melo (2014), Barbosa et al.

(2015), Chagas, Moura e Carneiro (2016), Guilherme et. al (2016); Xavier (2018); Alexandre *et. al* (2020); Bandeira, Neto, Rolim (2017); Bandeira (2020); Diógenes (2021), Batista (2021) e Rodrigues *et. al* (2022).

Neto (2013) estudou o solo de uma Jazida da cidade de Quixadá, utilizado para construção de uma pequena barragem de terra experimental por meio de ensaios de laboratório e aplicação numérica. Os resultados alcançados nos ensaios mostraram que a variação de umidade de compactação não provoca redução ou aumento relevante nas deformações específicas na fase de colapso do solo e que a colapsibilidade diminui com o aumento da massa específica do solo. A partir da modelagem numérica foi constatado que o colapso ocorre nos espaldares do maciço, mas que o núcleo da barragem não colapsa, garantindo, portanto, que as deformações de colapso não se propagam de montante para jusante do maciço. O autor concluiu que os estudos experimentais e numéricos apontaram condições de estabilidade, para uma obra com tais características.

Figura 3: Proporção de ocorrências no BANDASE para 526 amostras do Brasil



Fonte: Holanda (2022).

Melo (2014) realizou um estudo na área de expansão do Cariri Shopping Center, na cidade de Juazeiro do Norte, onde comprova a importância da análise do potencial de colapso dos solos, para elaboração de projetos de fundações superficiais, em solos não saturados. Os ensaios utilizados foram o edométrico simples e duplo. A estrutura do solo apresentou um potencial de colapso de 3,0 % a partir de uma tensão de 20 kPa.

Barbosa *et. al* (2015) apresentou resultados de um estudo da colapsibilidade do solo de um trecho da obra do Cinturão das Águas do Ceará (CAC), localizado na zona

rural do município de Missão Velha. Os autores verificaram o potencial de colapsividade através do equipamento Expansocolapsômetro e por meio de ensaios edométricos simples e duplo. Os resultados apresentaram potenciais de colapso superiores a 2%, sendo classificado como colapsível, conforme o critério de Vargas (1978). De acordo com os autores, tais resultados são de suma importância para esse tipo de obra, tendo em vista que este tipo de estrutura apresenta possibilidade de ocorrências de vazamentos ao longo do trecho do canal, acarretando, para esse tipo de solo, o fenômeno de colapso, caso não seja realizado tratamento prévio.

Chagas, Moura e Carneiro (2016) estudaram um solo silte argiloso na cidade de Icó que seria utilizado como suporte de fundações das estruturas de um conjunto habitacional. O referido estudo buscou analisar a eficiência da técnica de compactação para reduzir o potencial de colapso/expansão do solo. Os resultados dos ensaios de adensamento simples e duplo mostraram a efetividade na minoração ou mesmo eliminação do potencial de expansão/colapso do solo estudado.

Guilherme (2015) apresentou resultados de um estudo do potencial de colapso de um solo areno siltoso, coletado próximo da Cadeia Pública da cidade de Barbalha, obtendo um potencial de colapso no valor de 13,3%, obtido por meio de ensaio Edométrico Simples em amostra com umidade inicial de 2,0%. Buscando entender a relação do comportamento do solo com as rachaduras presentes nesta edificação, Guilherme *et. al* (2016) encontrou, no campo, o potencial de colapso de 4,04%. Constatou-se que a diferença entre os valores tem forte relação com a umidade inicial do solo, pois quanto menos úmido estiver o solo, maior a possibilidade de colapso. O potencial de colapso obtido através do Expansocolapsômetro classificou o solo como colapsível, segundo Vargas (1978) e como problema moderado, que é quando o potencial de colapso está entre 1 e 5 %, segundo Jennings e Knight (1975).

Bandeira, Neto, Rolim (2017) estudaram o solo de um condomínio no Crato, Ceará, que apresentou fraturas em suas 18 unidades, decorrentes do colapso do solo. A investigação revelou um solo argilo-siltoso com comportamento colapsível e um potencial de 12,8% na tensão da obra, classificado como "problema grave". Os recalques adicionais contribuíram para as fraturas, destacando a necessidade de comunicação entre projetistas estruturais e engenheiros de fundações sobre a resistência dos materiais na interação solo-estrutura (ISE).

Xavier (2018) buscou estudar o comportamento geotécnico de um solo colapsível e avaliar o seu comportamento quando submetido a um processo de

umedecimento e a sobrecargas. O estudo foi realizado no campo experimental da UFCA, localizado na cidade de Juazeiro do Norte. Concluiu-se que o recalque obtido na prova de carga sobre placa no período seco foi em torno de 3 mm para a tensão de 320 kPa, que por sua vez, corresponde a 2,4% do recalque obtido no período chuvoso para a tensão de 240 kPa (126 mm). Tais resultados reforçam como a resistência e a rigidez do solo diminuem com a redução da sucção.

Alexandre *et al.* (2020) avaliaram a expansibilidade de um solo de fundação de um conjunto residencial localizado no município de Juazeiro do Norte por meio da coleta de amostras indeformadas e ensaios edométricos. Os autores analisaram 3 amostras, denominadas Amostra 01-vermelha, Amostra 01-cinza e Amostra 02. As cores foram obtidas pela classificação táctil-visual. Os resultados mostraram que de acordo com critérios estabelecidos por Holtz e Gibbs (1956), a Amostra 01-vermelha e a Amostra 02 foram classificadas como baixo potencial de expansão, que está entre 0% e 10%, já a Amostra 01-cinza se adequou na categoria de médio potencial de expansão, entre 10% e 20%. De acordo com os critérios de Seed *et al.* (1962), a Amostra 01-vermelha e a Amostra 01-cinza foram classificadas como de alto potencial de expansão, enquadrada entre 5% e 25%, e a Amostra 02 foi classificada como de médio potencial de expansão, entre 1,5% e 5%. A Amostra 02 quando inundada na tensão de 60 kPa, mesmo sofrendo uma leve expansão no final da saturação do solo, conferiu comportamento de colapso, com potencial de 1,5%, categorizado como baixo potencial. Considerando o critério de Vargas (1978) a Amostra 02 não se enquadra na categoria de solo colapsível ( $PC < PC < 5\%$ ).

Bandeira *et al.* (2020) estudaram o potencial de colapso de um solo no município de Crato através de ensaios de caracterização geotécnica, ensaios de resistência ao cisalhamento e ensaios edométricos simples e duplo. No ensaio edométrico simples, o corpo de prova foi inundado nas tensões de 50 e 100 kPa, obtendo-se um potencial de colapso de 7,7% e 10,4%, respectivamente. Em relação ao edométrico duplo, o solo foi considerado colapsível a partir de tensão de 40 kPa. Os autores concluíram que é necessário o tratamento do solo para receber fundações em qualquer porte de edificação.

Diógenes (2021) utilizou de ensaios laboratoriais tais como limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), granulometria, compactação e densidade real, bem como a realização do ensaio edométrico para identificação do caráter expansivo do solo. A intenção do estudo era explicar as manifestações patológicas que surgiram no prédio

do campus da Universidade Federal do Ceará em Russas. Segundo os resultados, o solo apresentou LL e LP medianos, variando de 26 a 34% e de 8 a 13%, respectivamente. Considerando o ensaio edométrico, o solo se trata de uma argila de baixa compressibilidade, a qual possui índice de expansão livre de 3,94% e grau de expansibilidade média, além disso o solo apresentou como tensão de expansão no valor de 90 kPa, concluindo assim que o solo possui comportamento expansivo.

Rodrigues et. al (2022) mostram o potencial de colapso de uma amostra de solo coletada em um bairro nobre do município de Juazeiro do Norte. Através de ensaio edométrico duplo, foi observado que a partir de 40 kPa, o potencial de colapso era superior a 8%, concluindo que a análise do comportamento do solo não saturado é de grande importância para elaboração de projetos de fundações, onde a obtenção apenas da tensão admissível do solo pode não ser suficiente para a estabilidade das fundações.

No Quadro 3, tem-se um resumo dos estudos realizados sobre a ocorrência de solos colapsíveis e expansivos no estado do Ceará. Verifica-se que os estudos concentram-se na caracterização dos solos colapsíveis e que, em apenas dois deles, os solos expansivos foram estudados.

Quadro 3: Estudos realizados sobre a ocorrência de solos colapsíveis e expansivos no estado do Ceará

<b>Autor</b>	<b>Local</b>	<b>Solo</b>	<b>Obra</b>	<b>Metodologia</b>
Neto (2013)	Quixadá	colapso	Construção de uma pequena barragem de terra experimental	Ensaio de laboratório e aplicação numérica
Melo (2014)	Juazeiro do Norte	colapso	Projetos de fundações superficiais para a obra de expansão do Cariri Shopping Center	Ensaio edométrico simples e duplo.
Barbosa et. al (2015)	Missão Velha	colapso	Obra do Cinturão das Águas do Ceará (CAC)	Expansocolapsômetro e ensaios edométricos simples e duplo.
Chagas, Moura e Carneiro (2016)	Icó	colapso / expansão	Fundações das estruturas de um conjunto habitacional.	Ensaio edométrico simples e duplo
Guilherme et. al (2016)	Barbalha	colapso	Rachaduras presentes na Cadeia Pública	Ensaio Edométrico Simples
Xavier (2018)	Juazeiro do Norte	colapso	Campo experimental da UFCA	Prova de carga sobre placa
Alexandre et. al	Juazeiro do	colapso /	Fundação de um conjunto	Ensaio edométricos

(2020)	Norte	expansão	residencial	
Bandeira <i>et al.</i> (2020)	Crato	colapso	-	Ensaio de caracterização, resistência ao cisalhamento e edométricos simples e duplo.
Diógenes (2021)	Russas	expansão	Manifestações patológicas no prédio UFCE	Caracterização física, compactação e densidade real, e ensaio edométrico
Rodrigues <i>et. al</i> (2022)	Juazeiro do Norte	colapso	Projetos de fundações	Ensaio edométrico duplo

Fonte: A autora (2024).

## 2.5 Cartografia Geotécnica

De acordo com Zuquette e Nakazawa (1998), os termos cartografia e mapeamento geotécnico são comumente encontrados como similares. Wolski *et al.* (1998) ressaltam que as terminologias são diferentes e explica o mapeamento geotécnico como sendo um processo que compreende todos os procedimentos fundamentais para a obtenção da carta geotécnica por meio de investigação dos atributos, isto é, a obtenção das informações e dados geotécnicos, já a cartografia geotécnica diz respeito a uma representação gráfica dos produtos oriundos do mapeamento.

Consoante Zuquette (1987), uma carta geotécnica se refere a uma representação gráfica na qual são avaliados todos os componentes de um ambiente geológico, de particular interesse para o planejamento, projeto e construção civil. Para o autor, o referido processo visa basicamente realizar o levantamento, a avaliação e a análise dos atributos que contemplam o meio físico. Tais informações devem ser manipuladas por processos de seleção, generalização, adição e transformação, de modo a serem correlacionadas, interpretadas e, por fim, serem representadas em mapas, cartas e anexos descritivos voltados a engenharia, o planejamento, o saneamento, dentre outras finalidades.

Sob o ponto de vista de Monteiro (2020), a cartografia geotécnica é considerada uma técnica de integração, síntese e representação de áreas de geologia e engenharia

voltada para obras, planejamento, gestão ambiental urbana e territorial, permitindo a formulação de modelos de previsibilidade do comportamento dos terrenos e estudos de soluções para os problemas decorrentes da intervenção antropológica sobre o meio físico.

Monteiro (2020) relata que apesar do desenvolvimento irregular ao decorrer o tempo, a cartografia geotécnica em zonas urbanas vem avançando continuamente e que a difusão dos SIG, intensificada na última década do século passado, veio a proporcionar um passo significativo no desenvolvimento da cartografia geotécnica, por meio das bases de dados georreferenciadas e das novas ferramentas de análise de dados, a exemplo do geoprocessamento e sensoriamento remoto.

Segundo Silva (2003), a cartografia geotécnica deve ser um documento gráfico de caráter rigoroso e o menos subjetivo possível, na qual a informação geológica e geotécnica é essencial para o planejamento e gestão do território, de modo a apoiar os projetos de engenharia em termos de aptidão geotécnica dos terrenos.

De modo geral, o uso da cartografia geotécnica, voltada ao planejamento de uso e ocupação dos solos, deve ser cada vez mais instigada, estudada e desenvolvida. Para Aquino (2010), condicionantes como a pedologia, geologia, clima, geomorfologia e hidrologia auxiliam na avaliação dos processos de riscos geotécnicos na Engenharia Civil.

Ferreira (1999) relacionou a suscetibilidade ao colapso e à expansão dos solos de Pernambuco com três dos condicionantes mencionados anteriormente, sendo eles a pedologia, climatologia e geologia. Através do cruzamento desses mapas temáticos, o autor obteve as cartas de suscetibilidade de ocorrências de solos colapsíveis e expansivos. Ferreira (1993) relatou o potencial de colapso e expansão apenas com a pedologia dos solos de Pernambuco.

Vasconcelos (2001), Amorim (2004) e Ferreira, Amorim e Silva (2008) utilizaram os mesmos condicionantes considerados por Ferreira (1999), no entanto, os classificaram em três níveis de suscetibilidade (baixo, médio e alto), com a finalidade de elaborar as cartas de suscetibilidade a ocorrência de solos expansivos e colapsíveis para Pernambuco. E de forma análoga, Silva (2003) e Aquino (2020) elaboraram documentos cartográficos para a apresentação de suscetibilidade ao colapso e à expansão, porém, para as cidades de Petrolina-PE e Teresina-PI, respectivamente. Já Borges, Ferreira e Amorim (2021) elaboraram a carta de suscetibilidade à ocorrência de

solos colapsíveis com base nos mesmos condicionantes supracitados, entretanto, para a Região do Semiárido brasileiro.

#### 2.4.1 Geoprocessamento e Sistema de Informações Geográficas

Conforme INPE (2001), o termo Geoprocessamento refere-se a uma ferramenta de aprendizagem que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que tem influenciado de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional.

Entre essas ferramentas destacam-se, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o Sensoriamento Remoto (SR). O SR tem como função primordial fornecer dados precisos e de maneira rápida sobre a área de estudo, enquanto o SIG tem importância principal no armazenamento, na análise espacial e no cruzamento de dados sobre as variáveis presentes no espaço (LEITE *et al.*, 2011).

De acordo com o INPE (2001), os Sistemas de Informação Geográfica (GIS) também denominado (Geographic Information System) são ferramentas computacionais para Geoprocessamento, que permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados, tornando ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

Para Silva (2003), os GIS se referem às tecnologias capazes de capturar, gerenciar, manipular e analisar dados de fontes diversas, referenciados espacialmente, reestruturando-os e apresentando-os para a solução de problemas complexos de planejamento e gerenciamento. Ele complementa dizendo que esta ferramenta é capaz de executar análises complexas com a integração de dados de uma variedade de fontes e escalas, criar banco de dados georreferenciados, portadores de campos que indicam a localização das entidades neles armazenadas, além de produzir mapas através das técnicas da cartografia digital e realizar operações entre mapas através da álgebra de mapas. Finaliza afirmando que as diversas funções disponíveis nos SIG possibilitam a realização de análises espaciais através dos atributos espaciais e não espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados espaciais. Tais funções possibilitam o cálculo da distância entre objetos no espaço, a extensão de um corpo hídrico bem como de uma rodovia (feições lineares) e também áreas e perímetros poligonais.

A utilização do SIG para a organização e análise dos dados é uma atividade obrigatória na cartografia geotécnica e sua utilização é amplamente recomendada devido à grande quantidade de dados que é manipulada (OLIVEIRA, 2018). Portanto, os SIG são eficazes na solução de problemas, servindo de suporte para o planejamento e tomada de decisão (NOÉ *et al.*, 2014)

#### 2.4.2 Projeções Cartográficas

A superfície terrestre é curva e de acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2001), todos os mapas são representações aproximadas da superfície terrestre, isso porque não é possível representar uma superfície curva em uma superfície plana, sem haver deformações. Sendo assim, os mapas preservam algumas características, ao passo que alteram outras. Com isso, os sistemas de projeções cartográficas funcionam de modo a correlacionar os pontos da superfície da Terra e seus correspondentes no plano de projeção do mapa.

De acordo com a revista FOSSGIS (2011), uma informação de natureza geográfica, nada mais é do que toda e qualquer informação ou fenômeno que possa ser associado ou referenciado a uma localização por meio de coordenadas (cartesianas, geodésicas, planas e projeção UTM). Segundo Noé *et al.* (2014), para representar a superfície da terra em um sistema de coordenadas cartográficas, deve-se adotar um sistema de projeção adequado.

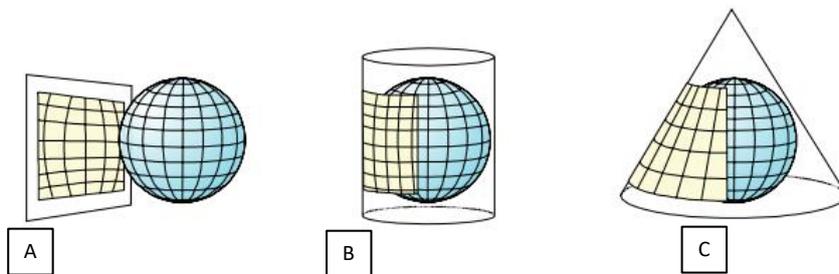
Existem distintos tipos de projeções cartográficas utilizadas na confecção de mapas, cada uma com suas características e com a finalidade de atender a objetivos diferentes (PARMA, 2003). De acordo com Gonçalves (2010), as propriedades das projeções podem ser classificadas como:

- Conformidade: também denominada isogonal, que preserva os ângulos ou formas de pequenas feições, mantendo a forma da superfície mapeada. Um exemplo que utiliza essa propriedade são as Projeções Mercatore UTM.
- Equivalência: também conhecida como Isometria, que mantém as relações de superfície, permanecendo a área da superfície mapeada inalterada em relação à área real do terreno, contudo, os ângulos apresentam deformações;

- Equidistância: que conserva a proporção entre a distância dos pontos representados no plano e os correspondentes na superfície de referência em dadas direções.
- E por fim, afiláticas: são aquelas que não apresentam nenhuma das características das propriedades supracitadas, portanto, não conservam as áreas e os ângulos.

Tais propriedades podem ser obtidas ao variar o tipo e a posição da superfície de projeção (DUARTE, 2006). Consoante Amorim (2004), as principais projeções se referem a projeção azimutal ou plana (Figura 4a), que projeta a superfície terrestre em um plano que é tangente ou secante a um ponto pré-estabelecido, a projeção cilíndrica (Figura 4b), na qual a superfície é projetada num cilindro para posteriormente ser representada de forma plana e por fim, a projeção plana (Figura 4c), que é quando o mapa é implementado considerando-se a superfície da terra projetada em um cone (secante ou tangente) para que em seguida, seja representada de forma plana.

Figura 4: Principais tipos de projeções cartográficas



Fonte: Amorim (2004).

Os países geralmente utilizam algum tipo de padrão na escolha do tipo de projeção a ser adotado, sendo definido de forma prévia, de modo a atender às exigências específicas. Segundo Carvalho *et al.* (2000), no Brasil é utilizado o padrão para projeções:

- Escalas 1:25.000 a 1:250.000 – UTM;
- Escalas 1:500.000 a 1:1000.000 – Lambert Million;
- Escala 1:5000.000 – Policônia;
- Cartas náuticas – Mercator.

No Quadro 4 são apresentados os principais tipos de projeções existentes e suas respectivas aplicações.

## 2.5 Mapas de Suscetibilidade

O mapeamento geotécnico é uma ferramenta que fornece atributos de cada região, bem como suas características específicas, buscando ter sempre a finalidade de fornecer informações importantes para o planejamento territorial, sendo ele em âmbito urbano ou regional (FORNASA, 2018). Por meio dele é possível gerar cartas de suscetibilidade a problemas inerentes a geotecnia, tais como deslizamentos, erosão e colapsabilidade de solos, dentre outros (CHRIST, 2019).

Quadro 4: Tipos de projeções e aplicações.

Tipo de projeção	Classificação	Aplicações
Cilíndrica Equidistante	Cilíndrica Equidistante	Mapa mundi, mapa em pequena escala e trabalhos computacionais.
Lambert	Cônica Conforme	Mapas temáticos, mapas políticos, mapas militares e cartas aeronáuticas;
Lambert Million	Cônica Conforme	Cartas ao milionésimo.
Mercator	Cilíndrica Conforme	Cartas náuticas e mapas mundi.
UTM	Cilíndrica Conforme	Mapas geológicos, mapeamento básico em escalas médias e grandes e cartas topográficas.
Policônica	Cônica	Mapeamento temático em escalas pequenas.

Fonte: Adaptado de D'Alge (2001).

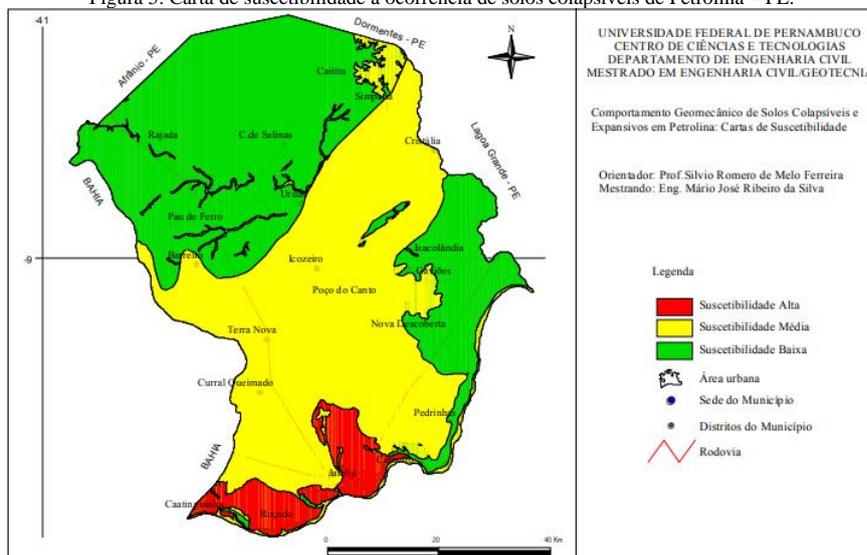
De acordo com Mesquita (2019), os mapas geotécnicos de suscetibilidade permitem a representação dos parâmetros de suscetibilidade da dinâmica superficial do meio físico. Para Souza e Sobreira (2015), as cartas são de suma importância para o planejamento regional, tendo em vista que localizam as áreas possíveis de serem ocupadas ao passo que restringem outras. Logo, elas podem auxiliar instrumentos de planejamento, dada a sua característica de orientação devido à sua escala.

Diversos pesquisadores buscaram desenvolver mapas de suscetibilidades voltadas a diversos problemas geotécnicos, tais como a possibilidade de erosão, deslizamento e/ou escorregamento (MIRANDA, 2005; GABERTI; ROBAÍNA, 2017; MESQUITA, 2019), bem como a ocorrência de solos colapsíveis e/ou expansivos (OLIVEIRA, 2002; SILVA, 2003; AMORIM, 2004; CHRIST, 2014; HOLANDA, 2022; BORGES *et al.* 2023).

Oliveira (2002) buscou avaliar e representar cartograficamente o risco de ocorrência do colapso de solos na área urbana de Ilha Solteira, no estado de São Paulo. De acordo com o estudo realizado, as obras de infraestrutura urbana (sistemas de água e esgotos) atreladas ao comportamento natural do solo, influenciam diretamente na situação de alta suscetibilidade de ocorrência de colapso de solos, tendo em vista a disseminação de ocorrências por toda a área em estudo. A avaliação do risco de colapso de solos foi dada em função da possibilidade de ocorrência de colapsividade e dos danos por ele causados por isso, foi possível constatar que a maioria das edificações cadastradas no município classifica-se com médio grau de risco. No que concernem os projetos de fundação futuros, o autor sugere a utilização de um maior número de elementos de fundação buscando uma melhor distribuição da carga nos mesmos; a adoção de fundação profunda o suficiente para atravessar a camada de comportamento colapsível, ou ainda o emprego de fundações rasas com compactação prévia.

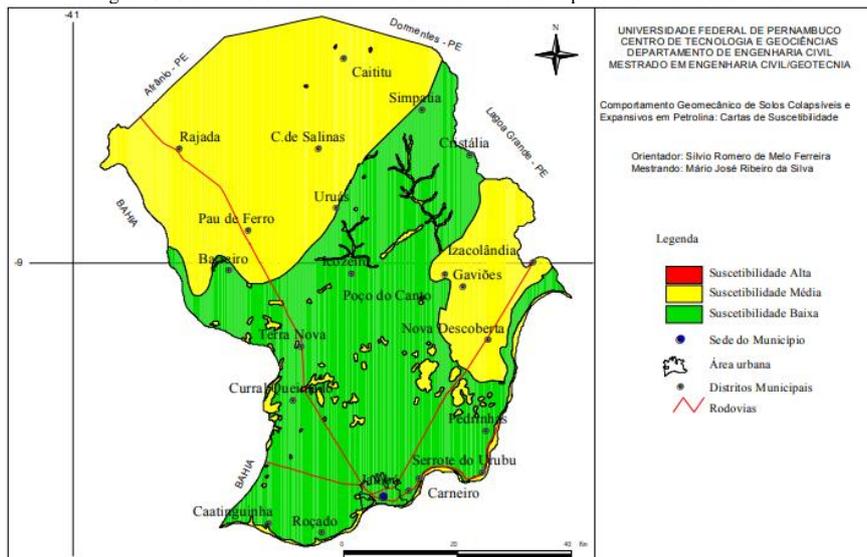
Silva (2003) elaborou cartas de suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos e realizou ensaios edométricos dos solos do município de Petrolina – PE. O autor elaborou as cartas hierarquizadas em alta, média e baixa suscetibilidade, com base na metodologia apresentada por Ferreira (2000), que considera a superposição de cartas de suscetibilidade ao colapso e expansão em função de três condicionantes, a saber: geologia, pedologia e clima. Os resultados mostraram que o município em estudo apresenta 50,3% dos solos com suscetibilidade ao colapso e 48% dos solos com suscetibilidade à expansão. Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas a carta de suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos, respectivamente, elaboradas com base na interseção dos três condicionantes supracitados.

Figura 5: Carta de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis de Petrolina – PE.



Fonte: Silva (2003).

Figura 6: Carta de suscetibilidade à ocorrência de solos expansivos de Petrolina – PE



Fonte: Silva (2003).

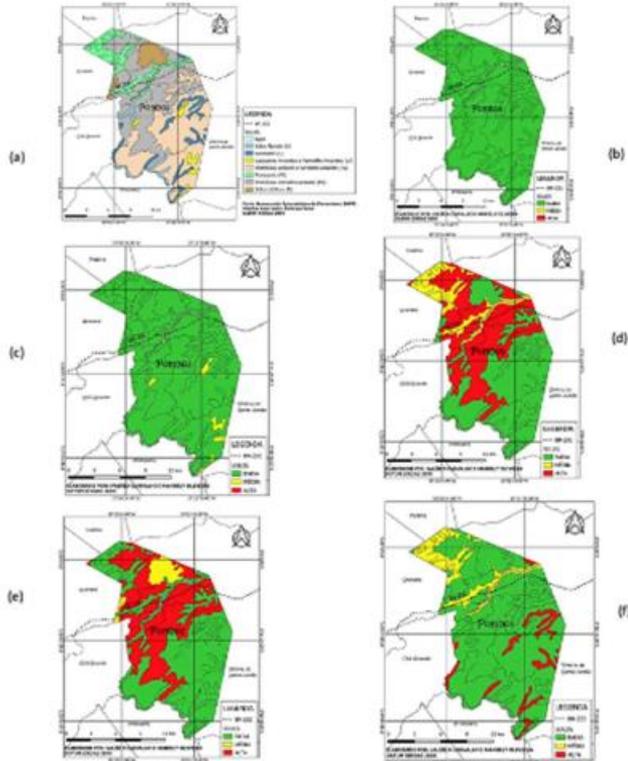
Amorim (2004) elaborou o Sistema de Informações Geográficas dos Solos Expansivos e Colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE) por meios de dados

oriundos de levantamentos climatológico, pedológico e geológico. O autor classificou as unidades de mapeamento de cada condicionante em três níveis de suscetibilidade, sendo eles: alto, médio e baixo, e gerando, portanto, cartas derivadas e interpretativas de zoneamento. Os resultados obtidos pelo autor mostram uma suscetibilidade à expansão alta em 12,5% da área do Estado, média em 38,7% e baixa em 45,2%, e ao colapso alta em 13,0%, média em 49,8% e baixa em 33,6%.

Christ (2014) realizou um estudo da colapsibilidade dos solos que compõem a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição no Estado de Santa Catarina. Para tanto, com base em um mapa geotécnico predefinido, foram estabelecidos parâmetros de colapsibilidade e gerado mapas de susceptibilidade ao colapso dos solos, sendo realizados ainda ensaios de caracterização física e edométricos com a finalidade de estimar o potencial de colapso. A autora constatou a presença de solos com problema de colapsibilidade moderado, sendo a unidade Areia Quartzosa de substrato sedimentos quaternários, o solo com maior potencial ao colapso encontrado no local de estudo. Os solos que apresentaram problemas moderados quanto à colapsibilidade contemplaram uma área de 44,96 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 79,4% da área das unidades estudadas.

Santos *et al.* (2021) realizaram uma análise de sensibilidade do solo do Município de Pombos-PE, em relação a problemas geotécnicos por cartas de suscetibilidade, tendo como base os parâmetros pedológicos da região. Para tanto, os autores realizaram um levantamento dos dados geográficos do solo do local, e posteriormente elaboraram as cartas de suscetibilidade e classificação quanto a sensibilidade do solo em baixa, média e alta, por meio do método utilizado por Amorim (2004). Os resultados apresentaram uma baixa suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos, 1,43% de média suscetibilidade a solos colapsíveis, 22,09% de alta suscetibilidade a solos dispersivos e erosivos e 10,49% de alta suscetibilidade a solos moles, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: Mapa pedológico (a) e Mapa de suscetibilidade dos Solos da cidade de Pombos, Pernambuco, Brasil: (b) expansão; (c) colapso; (d) dispersão; (e) erosão; (f) solos moles



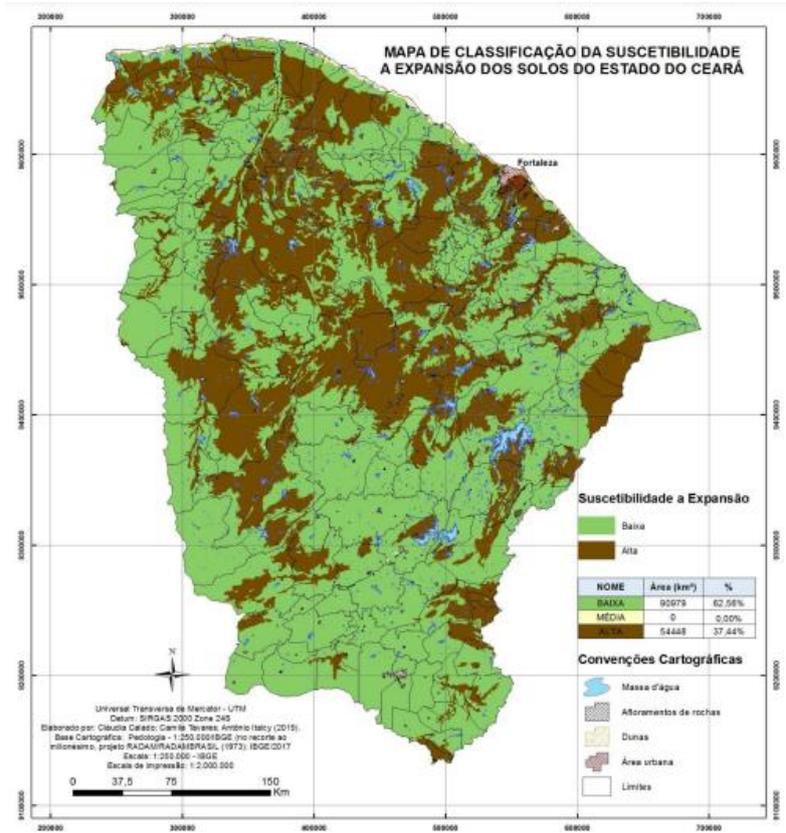
Fonte: Santos *et al.* (2021).

Aquino e Ferreira (2022) buscaram caracterizar uma argila expansiva presente no município de Teresina/PI, com base nos condicionantes geologia, pedologia e geotecnia. Para tanto, os autores realizaram ensaios físico, geomecânicos e microestrutural, sendo feito ainda o georreferenciamento da amostra aos mapas pedológico e geológico. Os resultados obtidos mostraram que a argila tem origem geológica da formação pedra de fogo e da pedologia de um argissolo vermelho-amarelo. Foi constatado ainda que a referida amostra apresenta um potencial de expansão “livre” de 1,9%, que pelo critério adotado pelo autor, que diz respeito ao critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), ela pode ser classificada com grau de expansão média. Ademais, a argila em estudo contempla a presença de argilominerias do tipo illita e caulinita, de acordo com a Microscopia eletrônica de Varredura.

Tavares *et al.* (2022) elaboraram mapas de suscetibilidade à expansão e ao colapso para o estado do Ceará por meio de informações pedológicas dos solos. Para tanto, os autores utilizaram um critério baseado na hierarquização da suscetibilidade à observação relativa, classificando a suscetibilidade em alta, média e baixa. De acordo com resultados obtidos, tem-se que 37,44% dos solos apresentam alta suscetibilidade à expansão, abrangendo uma área de 54.448 km<sup>2</sup>. Em relação aos solos colapsíveis, 6,88% dos solos apresentam alta suscetibilidade ao colapso, o que compreende uma área de 10.005 km<sup>2</sup>, conforme pode ser visto nas Figuras 8 e 9.

Holanda (2022) empregou RNA para classificar a suscetibilidade do solo através do valor da probabilidade de ocorrência de solo colapsível ou expansivo para todo o Brasil. Para tanto, a autora utilizou um banco de dados composto de 526 amostras de solos, sendo 267 de solos colapsíveis e 259 de solos expansivos, oriundas das 5 regiões do Brasil, contemplando variáveis geotécnicas e variáveis pedológicas, geológicas e climatológicas. A autora criou 3 redes, variando-se as variáveis de entrada e número de amostras. Duas redes foram construídas utilizando dados apenas de Pernambuco e a outra com dados do Nordeste e do Brasil, sendo esta última a de melhor desempenho. A autora concluiu que a identificação e classificação da suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos utilizando RNA, constitui uma contribuição técnico-científica relevante para o planejamento do uso e ocupação do solo.

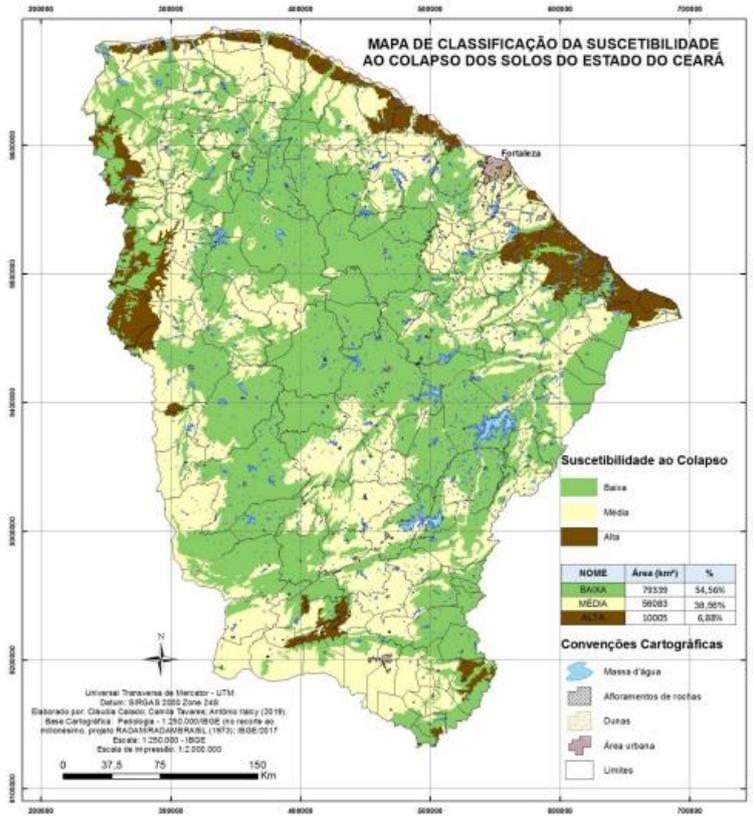
Figura 8: Mapa pedológico do Estado do Ceará quanto à suscetibilidade à expansão.



Fonte: Tavares *et al.* (2022).

Borges *et al.* (2023) desenvolveram uma carta de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos no Brasil desenvolvida por meio de RNA. A rede foi treinada utilizando um banco de dados de solos expansivos identificados por caracterização geotécnica composto de 526 amostras de dados. As variáveis de entrada foram a classificação pedológica, as unidades geológicas e os climatológicos. A identificação dos solos expansivos no país apresentou uma acurácia de 89,70% e precisão de 90,70% e denotaram uma suscetibilidade alta em 35,9%, média em 9,8%, baixa em 3,7%, classificação ausente em 48,0% e inconclusivo em 2,6% da extensão territorial.

Figura 9: Mapa pedológico do Estado do Ceará quanto à suscetibilidade ao colapso.



Fonte: Tavares *et al.* (2022).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

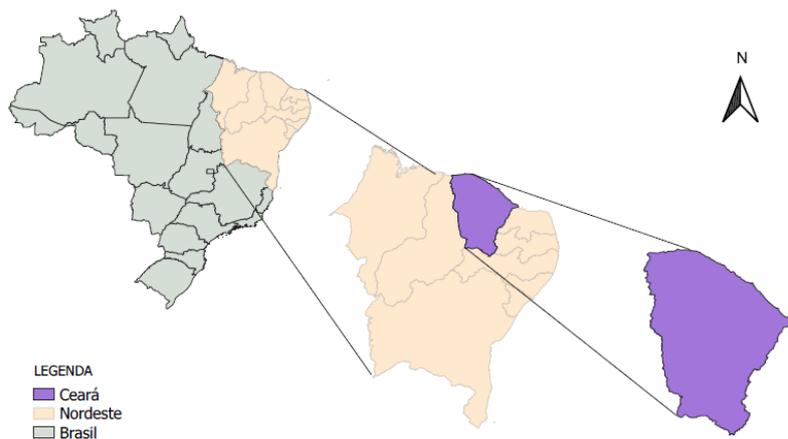
São apresentados os itens referentes à caracterização da área de estudo, no que diz respeito à suscetibilidade à expansão urbana, os condicionantes considerados, tais como Geologia, Pedologia e Clima. É abordado, ainda, o histórico de ocorrências de problemas ocasionados por solos expansivos e colapsíveis no Ceará. Por fim, é apresentado o método de pesquisa utilizado neste trabalho.

#### 3.1 Caracterização do estado do Ceará

O estado do Ceará apresenta uma população estimada de 8.794.957 habitantes, em 184 municípios do estado, sendo o 8º estado mais populoso do país, com área total de 148.894,447 km<sup>2</sup>, densidade demográfica 59,07 hab/km<sup>2</sup> e índice de desenvolvimento humano de 0,734 (IBGE, 2022).

O Ceará fica localizado na região Nordeste do Brasil, limitando-se a Norte com o Oceano Atlântico; ao Sul com o estado de Pernambuco; a Leste com os estados do Rio Grande do Norte e Paraíba e a Oeste com o estado do Piauí (Figura 10).

Figura 10: Mapa de Localização Geográfica do Ceará.



Elaboração Cartográfica: Leticia Moreira de Carvalho (2023)  
Fonte: Regiões do Brasil, Limites municipais do Ceará e Unidades Federativas do Brasil (IBGE, 2021)  
Sistema de Coordenadas Geográficas: datum SIRGAS 2000

Fonte: Modificado do IBGE (2021)

Em termos de extensão territorial, o Ceará é o 4º maior da região Nordeste, ficando em 17º entre os estados brasileiros. (MEDEIROS et. al, 2007).

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE) estabelece a Divisão Regional do Brasil, onde o estado do Ceará possui seis regiões geográficas intermediárias e 18 regiões geográficas imediatas. A divisão do estado também pode ser em sete mesorregiões (Figura 11) e trinta e três microrregiões (Figura 12). (CODEVASF, 2022).

A Microrregião é definida “como um conjunto de municípios, contíguos e contidos na mesma Unidade da Federação, definidos com base em características do quadro natural, da organização da produção e de sua integração”. Já a Mesorregião refere-se a uma área individualizada, onde se desenvolve certa organização de espaço geográfico, definido por três dimensões: processo social, quadro natural, e a rede de comunicação e de lugares. Estas dimensões permitem que o espaço delimitado como Mesorregião tenha uma identidade regional (CODEVASF, 2022).



Fonte: Modificado do IBGE (2021)

Figura 12: Microrregiões do estado do Ceará



Fonte: IBGE (2021).

Em concordância com a resolução nº 115, de 23 de novembro de 2017, o IBGE classifica as regiões Intermediárias, como sendo aquelas entre as Unidades da Federação, ou seja, metrópoles, capitais regionais e/ou centros urbanos de menores dimensões (principalmente onde não existiam metrópoles ou capitais) que são representativos no âmbito regional (DIVISÃO, 2017).

A Secretaria do Planejamento de Gestão (SEPLAG), adotou 14 regiões de planejamento do estado do Ceará, sendo elas: Cariri, Centro Sul, Grande Fortaleza, Litoral Leste, Litoral Norte, Litoral Oeste / Vale do Curu, Maciço de Baturité, Serra da Ibiapaba, Sertão Central, Sertão de Canindé, Sertão dos Crateús, Sertão dos Inhamuns, Sertão de Sobral e Vale do Jaguaribe. Estas regiões foram criadas para o aperfeiçoamento das atividades de planejamento, monitoramento e implementação de políticas públicas, conforme o IPECE.

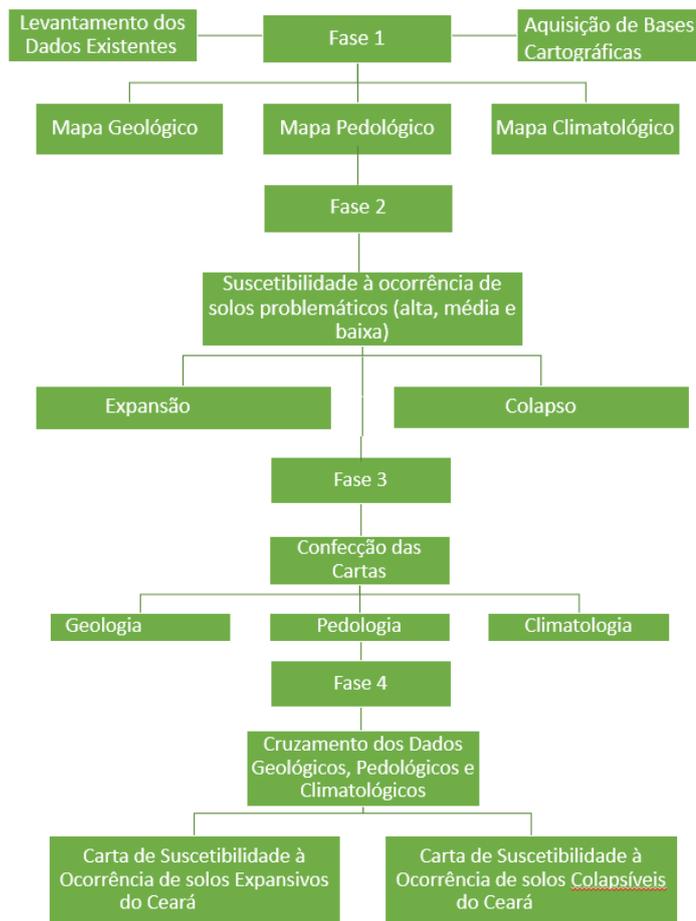
De acordo com Medeiros (2007), o Ceará apresenta em torno de 93% do seu território contido no semiárido nordestino. Esta característica explica a propensão a seca em determinados períodos do ano, especialmente pela irregularidade no tempo e no espaço e escassez pluviométrica, a qual é intensificada pelas altas taxas de evaporação/evapotranspiração.

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Elaboração de Mapas de Suscetibilidade

O mapa de suscetibilidade à ocorrência dos solos colapsíveis e expansivos do Ceará foi elaborado em 4 fases, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13: Fases para confecção de mapas de suscetibilidade



Fonte: Baseado em Aquino (2020)

### 3.2.1.1 Fase 1: Aquisição através de bases cartográficas

A Fase 1 consiste na aquisição de bases cartográficas. Para a Pedologia, o mapa em formato shapefile (shp.) foi adquirido através do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na aba Geociências/Cartas e Mapas/Bases Cartográficas Contínuas, já o mapa de Geologia foi obtido através da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), disponíveis em um conjunto de mapas e base de dados para download no banco de dados corporativo, o GeoSGB (<http://geosgb.cprm.gov.br>) e o mapa de Clima classificado segundo Thornthwaite foi obtido em formato shapefile através do site da Embrapa, o Geoinfo (<https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/3488>).

No Quadro 5 são apresentadas as bases de dados que foram utilizadas para obter os mapas de cada condicionante, bem como suas respectivas escalas.

Quadro 5: Bases de dados e escalas das condicionantes utilizadas.

Condicionantes	Bases de Dados	Escalas
Pedologia	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)	1:250.000
Geologia	Dados, Informações e Produtos do Serviço Geológico do Brasil (GeoSGB)	1:500.000
Clima	Dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (Geoinfo)	1:500.000

Fonte: Autora, 2024.

### 3.2.1.2 Fase 2: Suscetibilidade à ocorrência à expansão e ao colapso

Na Fase 2 foi realizada a avaliação do grau de suscetibilidade à ocorrência de solos problemáticos. A metodologia utilizada para avaliar a suscetibilidade à ocorrência dos solos expansivos e colapsíveis seguiu o estudo feito por Aquino (2020) e Amorim (2004), com adaptações explicadas a seguir, necessárias para o local de estudo. De Aquino (2020) foi utilizada a mesma metodologia para obter a suscetibilidade da Geologia e a utilização do método ponderado.

Segundo Amorim (2004), os solos problemáticos reúnem um conjunto de características geológicas, pedológicas e climatológicas que evidenciam seu comportamento com base nas descrições de cada unidade do mapeamento. Na Tabela 1, cada unidade do mapeamento foi classificada em três graus de suscetibilidade: ‘Alta’, ‘Média’ e ‘Baixa’, com os respectivos valores utilizados como peso.

Tabela 1: Graus de suscetibilidade, peso e descrição.

Suscetibilidade	Peso	Descrição
Alta	3	Ocorrência evidenciada através das propriedades geotécnicas características de solos problemáticos com base nas descrições de cada unidade do mapeamento
Média	2	Ocorrência Intermediária, onde apenas algumas descrições favorecem a ocorrência dos processos.
Baixa	1	Possibilidade reduzida ou inexistente a ocorrência dos processos.

Fonte: Amorim (2004)

Além dos graus de suscetibilidade, peso e descrição, também foi utilizado de Amorim (2004), os valores considerados para avaliação da Suscetibilidade Final.

De Aquino (2020), foi utilizada a mesma metodologia para confecção das Cartas Derivadas, com a diferença de que, na tabela de atributos dos mapas, foi acrescentada uma coluna com as suscetibilidades denominadas ‘Baixa’, ‘Média’ e ‘Alta’, enquanto neste trabalho, foram denominadas na coluna, os pesos, ‘1’, ‘2’ e ‘3’, respectivamente. Além disso, as cores utilizadas para representar as suscetibilidades, também foram diferentes. Aquino utiliza a cor vermelho para alta, amarelo para média e azul para baixa. Neste trabalho, alta e média continuaram vermelha e amarela respectivamente, porém, para baixa suscetibilidade, foi utilizada a cor verde.

Para a Pedologia, o grau de suscetibilidade foi adotado seguindo o trabalho de Tavares *et. al* (2020), “Utilização de SIG aplicada aos estudos de solos expansivos e colapsíveis do Estado do Ceará”. Na Figura 14 é apresentada a Matriz pedológica de suscetibilidade aos problemas geotécnicos, onde foram extraídas as informações obtidas de Expansão e Colapso.

Figura 14: Matriz pedológica de suscetibilidade aos problemas geotécnicos

<b>Classe Pedológica</b>	<b>Expansão</b>	<b>Erosão</b>	<b>Colapso</b>	<b>Dispersão</b>
Argissolo Amarelo	Alta	Alta	Média	Alta
Argissolo Vermelho	Baixa	Alta	Média	Alta
Argissolo Vermelho-Amarelo	Baixa	Alta	Média	Alta
Cambissolo Háplico	Alta	Alta	Baixa	Média
Chernossolo Argilúvico	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Chernossolo Háplico	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Chernossolo Rêndzico	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Gleissolo Melânico	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Gleissolo Sáfico	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Latossolo Amarelo	Baixa	Baixa	Média	Baixa
Latossolo Vermelho	Baixa	Baixa	Média	Baixa
Latossolo Vermelho-Amarelo	Baixa	Baixa	Média	Baixa
Luvissolo Crômico	Alta	Alta	Baixa	Alta
Neossolo Flúvico	Baixa	Baixa	Média	Baixa
Neossolo Litólico	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Neossolo Quartzarênico	Baixa	Alta	Alta	Baixa
Neossolo Regolítico	Baixa	Alta	Média	Baixa
Nitossolo Vermelho	Baixa	Alta	Alta	Baixa
Planossolo Nátrico	Alta	Alta	Baixa	Alta
Planossolo Háplico	Alta	Alta	Baixa	Alta
Vertissolo Ebânico	Alta	Alta	Baixa	Alta
Vertissolo Háplico	Alta	Alta	Baixa	Alta

Fonte: Calado, Oliveira Júnior, Tavares (2019)

Para a Geologia, o critério de suscetibilidade à expansão e ao colapso utilizado foi analisar a litologia superior, mineralogia e estratigrafia de poços do estado do Ceará. A litologia superior e a mineralogia foram obtidas através da tabela de atributos do mapa de Geologia do estado do Ceará. Além disso, a mineralogia foi confirmada através do Relatório “Mapa Geológico e de Recursos Minerais do estado do Ceará”, obtido pela mesma base de dados do mapa (GeoSGB). Foi consultado ainda o relatório da “Geodiversidade do estado do Ceará” elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil em 2014, onde no tópico “Limitações e Adequabilidades Frente ao Uso e Ocupação” são apresentadas suscetibilidades à erosão, expansão, colapso, entre outros, em cada domínio para Obras de Engenharia, servindo como confirmação das classificações adotadas. A metodologia da classificação quanto à expansão e ao colapso deu-se analisando a mineralogia da litologia superior de cada unidade litológica e classificando-a de acordo com a Tabela 2 proposta por Aquino (2020) e as Tabelas 3 e 4, proposta por Amorim (2004).

Tabela 2: Suscetibilidade à expansão e ao colapso do solo com relação a Geologia.

Suscetibilidade	Litologias	
	Expansão	Colapso
<b>ALTA</b>	Argilitos; folhelhos; calcários marinhos	Arenitos quartzosos; arenitos de dunas eólicas
<b>MÉDIA</b>	Siltitos;	Silexito; arenito caulínico
<b>BAIXA</b>	Silexito; arenitos quartzosos; arenito caulínico	Argilitos; folhelhos; calcários marinhos

Fonte: Aquino (2020)

Tabela 3: Suscetibilidade à expansão do solo com relação a Geologia.

SUSCETIBILIDADE	ROCHAS CRISTALINAS	ROCHAS SEDIMENTARES	SEDIMENTOS
<b>ALTO</b>	Rochas máficas; micaxistos; rochas carbonáticas	Argilitos; folhelhos; calcários marinhos	argilas
<b>MÉDIO</b>	Rochas intermediárias;	Arcósios; siltitos e arenitos calcíferos	Sedimentos areno-argilosos
<b>BAIXO</b>	Rochas ricas em quartzo; quartzitos	Arenitos quartzosos	Areias quartzosas, matéria orgânica e turfas

Fonte: Amorim (2004)

Tabela 4: Suscetibilidade ao colapso do solo com relação a Geologia.

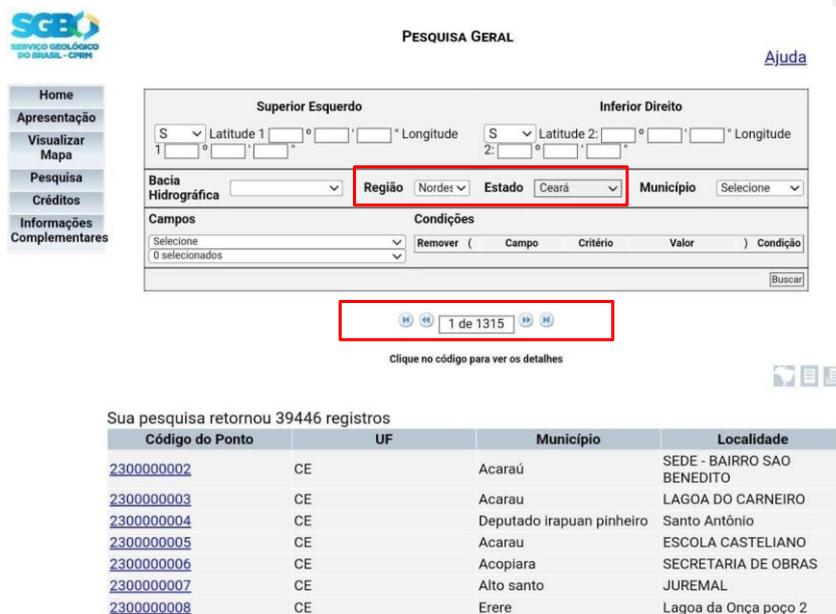
SUSCETIBILIDADE	ROCHAS CRISTALINAS	ROCHAS SEDIMENTARES	SEDIMENTOS
<b>ALTA</b>	Rochas ricas em quartzo; quartzitos	Arenitos quartzosos	Areias quartzosas
<b>MÉDIA</b>	Rochas intermediárias;	Arcósios; siltitos e arenitos calcíferos	Sedimentos areno-argilosos
<b>BAIXA</b>	Rochas máficas; micaxistos; rochas carbonáticas	Argilitos; folhelhos; calcários marinhos	Argilas; matéria orgânica e turfas

Fonte: Amorim (2004)

Para as unidades litológicas da tabela de atributos do mapa de Geologia que não ofereciam dados suficientes de minerais para classificar de acordo com as tabelas propostas por Aquino (2020) e Amorim (2004), foi necessário analisar as estratigrafias de poços para comprovar os minerais presentes. A base de dados utilizada foi o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), que disponibiliza dados de 1315 postos para o estado do Ceará (Figura 15).

Na Figura 16 é apresentado um posto da cidade de Aracoiaba, onde na aba “Geológico” é possível identificar a profundidade e descrição litológica da localidade perfurada.

Figura 15: Pesquisa Geral de Poços e Fontes Naturais de Serviço Geológico do Brasil.



**SGBD**  
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM

**PESQUISA GERAL** [Ajuda](#)

Home  
Apresentação  
Visualizar Mapa  
Pesquisa  
Créditos  
Informações Complementares

Superior Esquerdo: S Latitude 1: ° ' " Longitude 1: ° ' " \*  
Inferior Direito: S Latitude 2: ° ' " Longitude 2: ° ' " \*

Bacia Hidrográfica:  **Região**: Nordeste **Estado**: Ceará **Município**:

Campos:  Condições:  Remover ( Campo Critério Valor ) Condição

1 de 1315

Clique no código para ver os detalhes

Sua pesquisa retornou 39446 registros

Código do Ponto	UF	Município	Localidade
<a href="#">2300000002</a>	CE	Acaraú	SEDE - BAIRRO SAO BENEDITO
<a href="#">2300000003</a>	CE	Acarau	LAGOA DO CARNEIRO
<a href="#">2300000004</a>	CE	Deputado irapuan pinheiro	Santo Antônio
<a href="#">2300000005</a>	CE	Acarau	ESCOLA CASTELIANO
<a href="#">2300000006</a>	CE	Acopiara	SECRETARIA DE OBRAS
<a href="#">2300000007</a>	CE	Alto santo	JUREMAL
<a href="#">2300000008</a>	CE	Erere	Lagoa da Onça poço 2

Fonte: SIAGAS, 2024.

Figura 16: Aspectos geológicos do posto pesquisado



Fonte: SIAGAS, 2024.

Para o Clima, os dados de Tipos Climáticos do Ceará foram obtidos através do site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). O arquivo vetorial

encontra-se em coordenadas geográficas, Datum SIRGAS 2000 e foi publicado em junho de 2021.

Aquino (2020) fez a correlação entre a tipologia climática e os graus de suscetibilidade à expansão e colapso adotados com base no índice de umidade de THORNTHWAITE & MATHER (1955), mostrado na Figura 17.

Figura 17: Correlação entre tipologia climática, índice de umidade de THORNTHWAITE & MATHER (1955) e os graus adotados.

TIPO CLIMÁTICO	Iu (%)	SUSCETIBILIDADE
Árido	$-100 \leq Iu < -66,7$	ALTA
Semi-árido	$-66,7 \leq Iu < -33,3$	
Seco Sub-úmido	$-33,3 \leq Iu < 0$	MÉDIA
Úmido Sub-úmido	$0 \leq Iu < 20$	BAIXA
Úmido	$20 \leq Iu < 100$	
Super úmido	$100 \leq Iu$	

Fonte: Aquino (2020)

A tabela de Aquino (2020) foi correlacionada com os tipos climáticos do Ceará classificados por Thornthwaite e Mather, apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Graus de Suscetibilidade à expansão e colapso para a classificação climática de Thornthwaite e Mather para o Ceará.

Tipo Climático (THORNTHWAITE & MATHER)	Legenda	Suscetibilidade
Úmido	B1, B2, B3 e B4	Baixa - 1
Seco Sub - Úmido	C1 e C2	Média - 2

Fonte: Autora (2024)

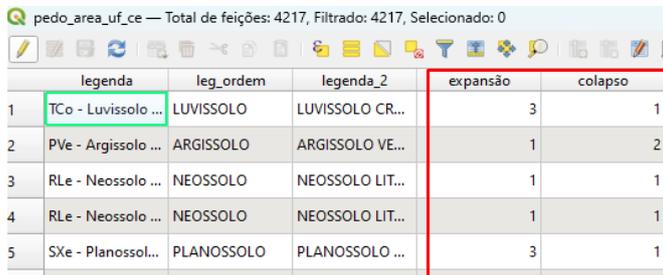
### 3.2.1.3 Fase 3: Confeção das Cartas Derivadas

A Fase 3 consiste na confecção das Cartas Derivadas. Nesta etapa, são aplicadas as informações coletadas nas fases 1 e 2. O Sistema de Informação Geográfica (SIG) possibilitou a execução de análise de dados georreferenciados, operados para a construção das cartas através do programa computacional QGIS 3.28 (versão estável mais atualizada). A elaboração utilizou dados vetoriais, com base cartográfica no formato shapefile (.shp), do estado do Ceará.

No SIG QGIS 3.28 foram inseridas informações na tabela de atributos, onde as cartas de suscetibilidade foram adotadas seguindo os passos abaixo:

- i) Adicionou-se a base cartográfica no formato shapefile (.shp) e na tabela de atributos foi criada uma coluna para expansão e outra para colapso, como apresentado na Figura 18.
- ii) Para cada unidade de mapeamento, foi atribuído um valor de acordo com a suscetibilidade (Baixa = 1, Média = 2 e Alta = 3). Foram analisadas 32 unidades para Pedologia e 151 unidades para Geologia.
- iii) Em “Propriedades” da camada shapefile no comando “Simbologia” e em seguida em “Categorizado” cada valor foi classificado em diferentes cores que representavam a suscetibilidade. Como ilustrado na Figura 19.

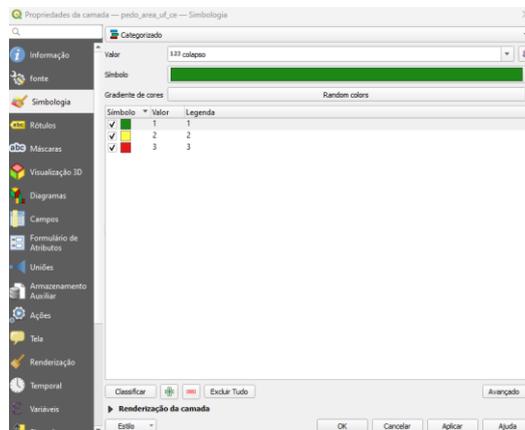
Figura 18: Tabela de atributos com coluna de expansão e colapso



	legenda	leg_ordem	legenda_2	expansão	colapso
1	TCo - Luvissole ...	LUVISSOLO	LUVISSOLO CR...	3	1
2	PVe - Argissolo ...	ARGISSOLO	ARGISSOLO VE...	1	2
3	RLe - Neossolo ...	NEOSSOLO	NEOSSOLO LIT...	1	1
4	RLe - Neossolo ...	NEOSSOLO	NEOSSOLO LIT...	1	1
5	SXe - Planossol...	PLANOSSOLO	PLANOSSOLO ...	3	1

Fonte: Autora, 2024.

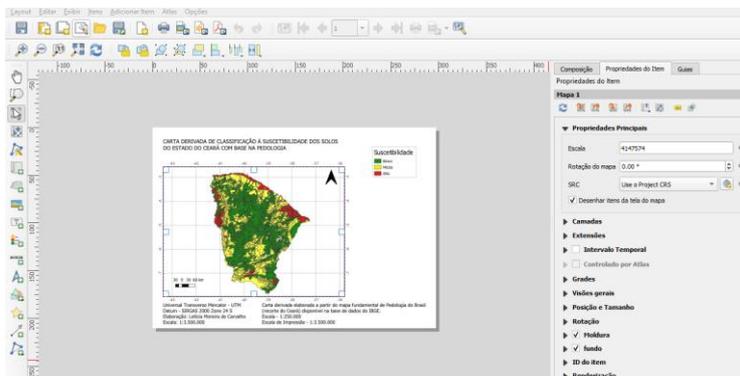
Figura 19: Valores de suscetibilidade ao colapso categorizado por cores



Fonte: Autora, 2024.

- iv) Em seguida, as cartas derivadas foram impressas pelo comando “Novo Compositor de Impressão”, onde foi possível acrescentar grade de coordenadas, escala, norte, legenda e título (Figura 20)

Figura 20: Impressão das cartas derivadas

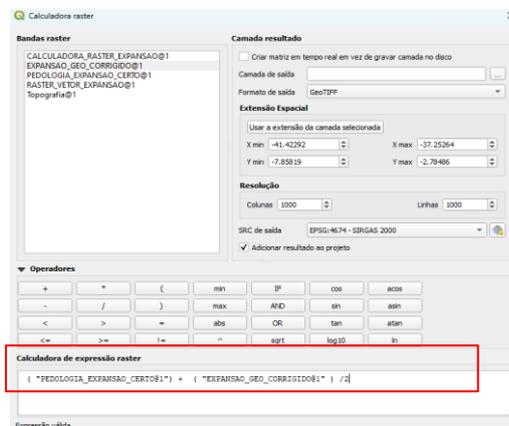


Fonte: Autora, 2024.

#### 3.2.1.4 Fase 4: Cruzamento das condicionantes: Pedologia, Geologia e Climatologia.

Na Fase 4 ocorreu o cruzamento de dados Geológicos, Pedológicos e Climatológicos, através de comandos do próprio QGIS 3.28, como a Calculadora Raster (Figura 21), que calcula a suscetibilidade das cartas derivadas pelo critério ponderado.

Figura 21: Suscetibilidade através do cruzamento da Pedologia, Geologia e Climatologia pelo critério ponderado, através da Calculadora Raster.



Fonte: Autora, 2024.

A classificação final se deu com base na Tabela 6, utilizada por Amorim (2004).

Tabela 6: Suscetibilidade final

Valores	Peso
$\geq 2,33$	Alto
$1,67 > x < 2,33$	Médio
$\leq 1,67$	Baixo

**Fonte:** Amorim (2004)

### 3.2.2 Confeção das Cartas de Suscetibilidade

#### 3.2.2.1 Geologia

Para a carta derivada de suscetibilidade à solos expansivos e colapsíveis com base na Geologia, buscou-se por informações sobre a Geologia do estado do Ceará. As cartas de suscetibilidade foram confeccionadas a partir do último mapa Geológico do estado do Ceará elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2021), disponibilizado em formato shapefile (shp.) numa escala de 1: 500.000, onde a partir da tabela de atributos deste arquivo foi elaborada a tabela critério (APÊNDICE I), composta pela litologia superior, mineralogia dominante / secundária e acrescentadas as colunas de suscetibilidade à expansão e ao colapso na própria tabela de atributos.

Além da tabela de atributos, também foram utilizadas informações da litologia do estado do Ceará disponibilizadas no site da CPRM, por meio do relatório intitulado “Projeto Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Ceará”. Sendo assim, a metodologia utilizada para definir o grau de suscetibilidade à expansão e colapso de cada unidade litológica se deu comparando as suscetibilidades das litologias do Ceará com as da litologia do Pernambuco, através de ALHEIROS (2003) disponibilizadas em AMORIM (2004) e, utilizando a Tabela 23 – Metodologia de Classificação à expansão e colapso com base na Litologia, apresentada por Aquino (2020). Além disso, foi verificada em cada unidade litológica, a composição de minerais com tendência a expansão e colapso, através do documento intitulado “Geodiversidade do Estado do Ceará”, elaborado também pela CPRM no ano de 2014. Para confirmar a litologia superior disponibilizada nos mapas, foram consultadas as colunas estratigráficas dos relatórios de perfuração de poços profundos disponíveis na plataforma do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), desenvolvida pelo Serviço Geológico

do Brasil. Vale destacar que os mapas estão disponíveis em um conjunto de mapas e base de dados para download no banco de dados corporativo, o GeoSGB (<http://geosgb.cprm.gov.br>), e no RIGEO - Repositório Institucional de Geociências (<http://rigeo.cprm.gov.br>). Todos os passos da metodologia das cartas derivadas de Geologia, foram fundamentadas com base na pesquisa de Amorim (2004) e Aquino (2020).

O mapa Geológico do estado do Ceará elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2021) apresentado na Figura 22 ilustra as unidades litoestratigráficas do Ceará.

Na Figura 23 é apresentado o fluxograma contendo uma síntese dos procedimentos metodológicos utilizados para confecção das cartas de suscetibilidade derivadas da Geologia.

#### 3.2.2.2 *Pedologia*

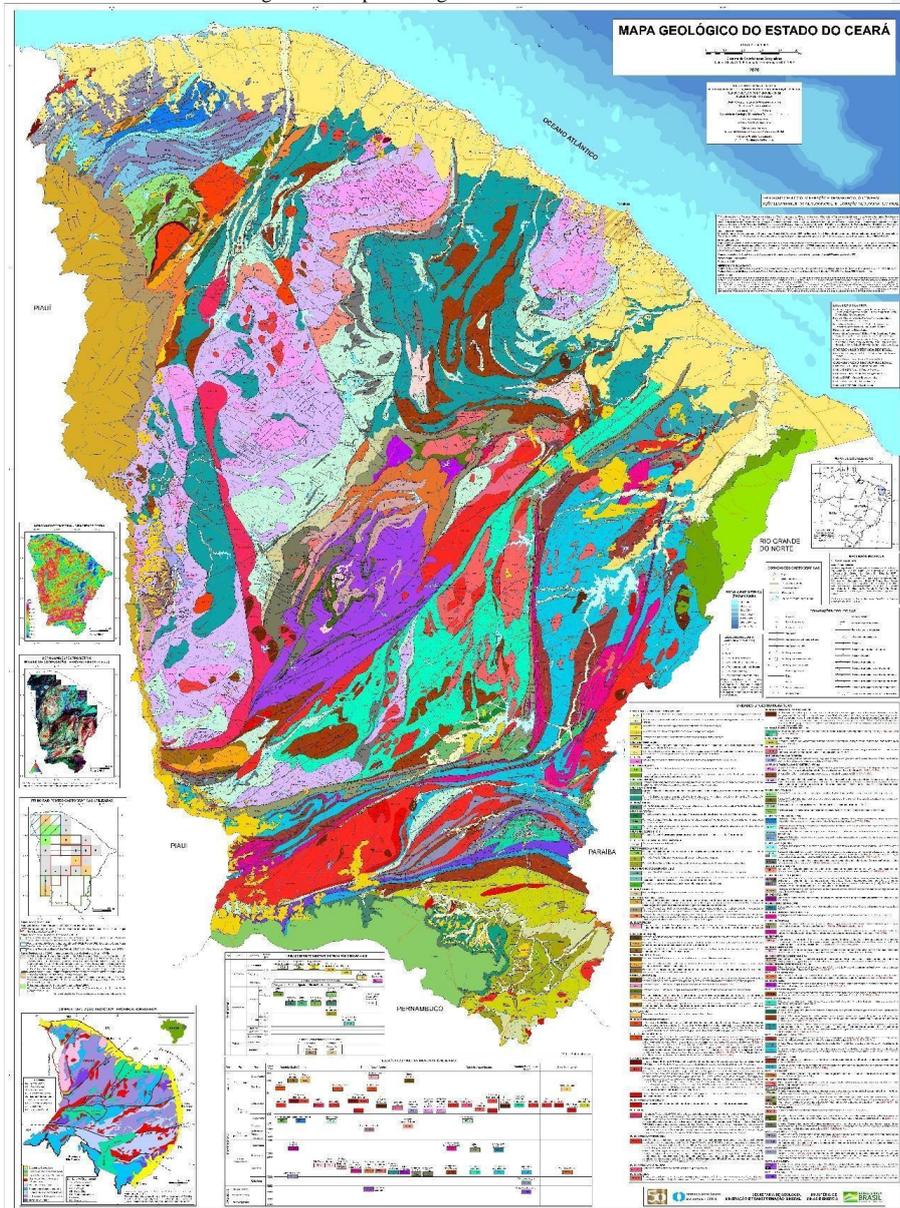
As cartas derivadas de suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e expansivos, baseadas na Pedologia, para o estado do Ceará, foram confeccionadas a partir do último mapa pedológico do Brasil (2019) obtido em formato shapefile (shp.) pelo site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em uma escala de 1:250.000. Para a confecção da carta, foi recortada a área correspondente ao estado do Ceará e utilizada a tabela de atributos com os tipos de solo do estado.

Utilizando o QGIS 3.28 como software, foi adicionado o arquivo shp. do mapa pedológico do Ceará e na tabela de atributos foram adicionadas duas colunas, uma para expansão e outra para colapso. A metodologia utilizada para definir a suscetibilidade dos solos quanto à expansão e ao colapso foi baseada na dissertação de Amorim (2004).

A informação da classificação quanto à expansão e ao colapso foram obtidas através de uma tabela intitulada “Matriz de suscetibilidade à expansão e ao colapso baseado na pedologia dos solos” presente no artigo de Tavares et. al (2020).

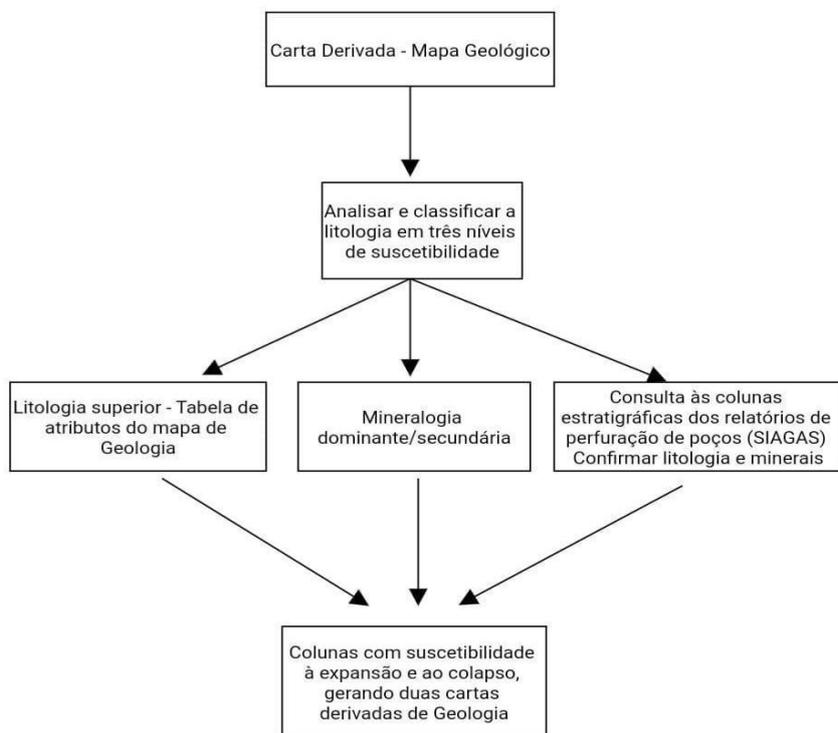
O artigo se baseia em um relatório de um levantamento dos solos do estado do Ceará, disponibilizado pelo Banco de Dados de Informações Ambientais do IBGE, com dados de 1978 do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos da Embrapa. Inicialmente, foram identificadas as unidades pedológicas do estado e suas características geotécnicas para avaliar a suscetibilidade dos solos e suas aplicações na engenharia.

Figura 22: Mapa Geológico do estado do Ceará



Fonte: CPRM (2021)

Figura 23: Metodologia empregada na elaboração das Cartas Derivadas da Geologia



Fonte: Autora (2024)

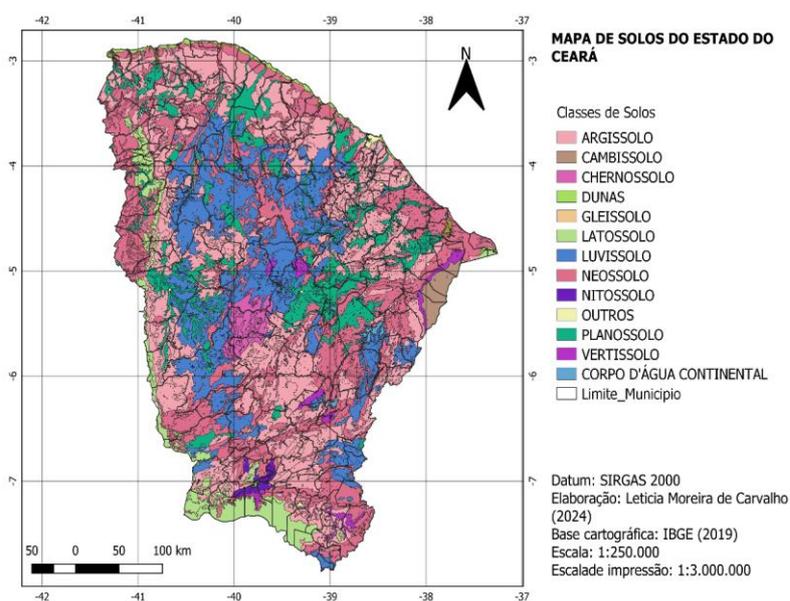
Em relação às características pedológicas consideradas, foram criadas, pelos autores do artigo “Utilização de SIG aplicada aos estudos de solos expansivos e colapsíveis do Estado do Ceará”, matrizes pedológicas que relacionam qualitativamente as unidades de solo com problemas geotécnicos (expansão, erosão, dispersão e colapso) e suas aplicações em obras (barragens, estradas, aterros sanitários, canais de irrigação e fundações rasas). A suscetibilidade dos solos foi classificada em três níveis (baixo, médio e alto) e a aplicação em obras em bom, médio ou ruim, seguindo o critério de Amorim (2004). Este, considerou o critério proposto por Ferreira (1999) para a classificação do grau de suscetibilidade de cada unidade taxonômica, fundamentado em um extenso estudo bibliográfico. A comparação das particularidades dos solos colapsíveis e expansivos com as características de cada unidade taxonômica permitiu a

sua classificação quanto à suscetibilidade de ocorrência desses fenômenos, bem como a avaliação de sua potencialidade, categorizada como alta, média e baixa.

As áreas com uma única unidade pedológica foram avaliadas com base nas características dessa unidade. Nas áreas com associações de duas unidades, foi considerada a suscetibilidade mais desfavorável. As informações foram processadas em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) usando o ArcGIS, permitindo análises georreferenciadas e criação de bancos de dados. O mapa pedológico utilizado foi baixado do site do IBGE e georreferenciado pelo Datum SIRGAS 2000, zona UTM 24S.

O Mapa Pedológico utilizado para elaboração da suscetibilidade à expansão e colapso deste trabalho, bem como o mesmo utilizado no relatório, está apresentado na Figura 24.

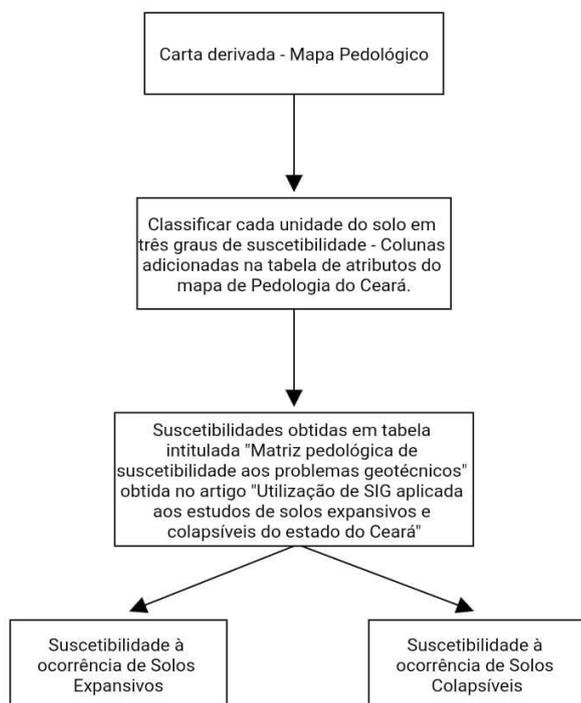
Figura 24: Mapa Pedológico do estado do Ceará



Fonte: Elaborado pela autora com base em IBGE (2019)

Na Figura 25 é apresentado o fluxograma contendo uma síntese dos procedimentos metodológicos utilizados para confecção das cartas de suscetibilidade derivadas da pedologia.

Figura 25: Metodologia empregada na elaboração das Cartas Derivadas de Pedologia



Fonte: Autora (2024)

### 3.2.2 Climatologia

Clima árido e semiárido possuem como característica, longos períodos de seca e fortes chuvas em curtos períodos, o que favorece a ocorrência de solos expansivos e colapsíveis. Regiões tropicais propiciam o desenvolvimento desses solos visto que apresentam lixiviação de finos nos horizontes superficiais nas regiões onde se alternam estações de relativa seca e de precipitações intensas (VILAR *et al.*, 1981; FERREIRA, 1995).

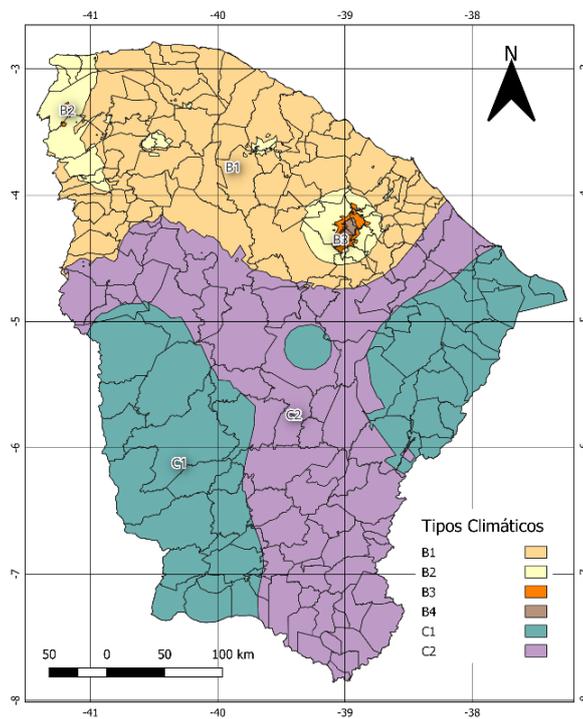
Para se quantificar a influência do clima no desencadeamento de formação de solos expansivos e colapsíveis, é preciso compreender o balanço hídrico (AQUINO, 2020). O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) realiza o monitoramento Climático sobre o Brasil, fornecendo dados como Precipitação, temperatura e umidade.

Além da precipitação acumulada média anual, os métodos de classificação climática de Köppen e Thornthwaite utilizam também a temperatura média anual (Muniz et. al, 2017).

Para esta pesquisa, foi utilizado o mapa de classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955) do Ceará (disponibilizado pela Geoinfo - EMBRAPA) onde foi obtido através da tabela de atributos do mapa os tipos climáticos, úmido (B1, B2, B3 e B4) e Seco subúmido (C1 e C2). O mapa de classificação climática de Thornthwaite e Mather está apresentado na Figura 26.

Figura 26: Mapa de Clima do Ceará pela classificação de Thornthwaite e Mather.



Datum: SIRGAS 2000  
 Elaboração: Leticia Moreira de Carvalho  
 Base Cartográfica: Geoinfo - EMBRAPA  
 (2021)  
 Escala: 1:2.500.000

Fonte: Elaborado pela autora com base em CEM (2021).

## 4. RESULTADOS

São apresentados os resultados dos critérios de suscetibilidade e as cartas derivadas com base na suscetibilidade à expansão e colapso dos três condicionantes: Geologia, Pedologia e Clima, assim como a porcentagem das suscetibilidades de solos expansivos e colapsíveis e possíveis análises baseadas nas propriedades consideradas do estudo. Por fim, são apresentadas as cartas interpretativas de expansão e colapso resultantes do método ponderado entre as três condicionantes citadas, e os pontos de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis do estado do Ceará, encontrados em bibliografia.

### 4.1 Cartas derivadas de Suscetibilidade à ocorrência de Solos Expansivos e Colapsíveis

#### 4.1.1 Base Geológica

Seguindo a metodologia proposta, na Tabela 7 são apresentadas as variáveis utilizadas (litologia superior e minerais dominantes/ secundários). Para cada unidade geológica foi atribuído um grau (Alto, Médio ou Baixo), onde este grau se deu pela média ponderada dos graus atribuídos à litologia e minerais dominantes.

Do mapa fundamental geológico, foram obtidas duas cartas derivadas: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos com base na Geologia do Ceará (Figura 27) e Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis com base na Geologia do Ceará (Figura 28).

Considerando apenas a Geologia, os solos da superfície do Ceará apresentaram baixa (44,65%), média (45,45%) e alta (9,90%) suscetibilidade à expansão (Figura 29). Quanto ao colapso, os percentuais foram: baixa (23,70%), média (37,63%) e alta (38,67%) suscetibilidade (Figura 30).

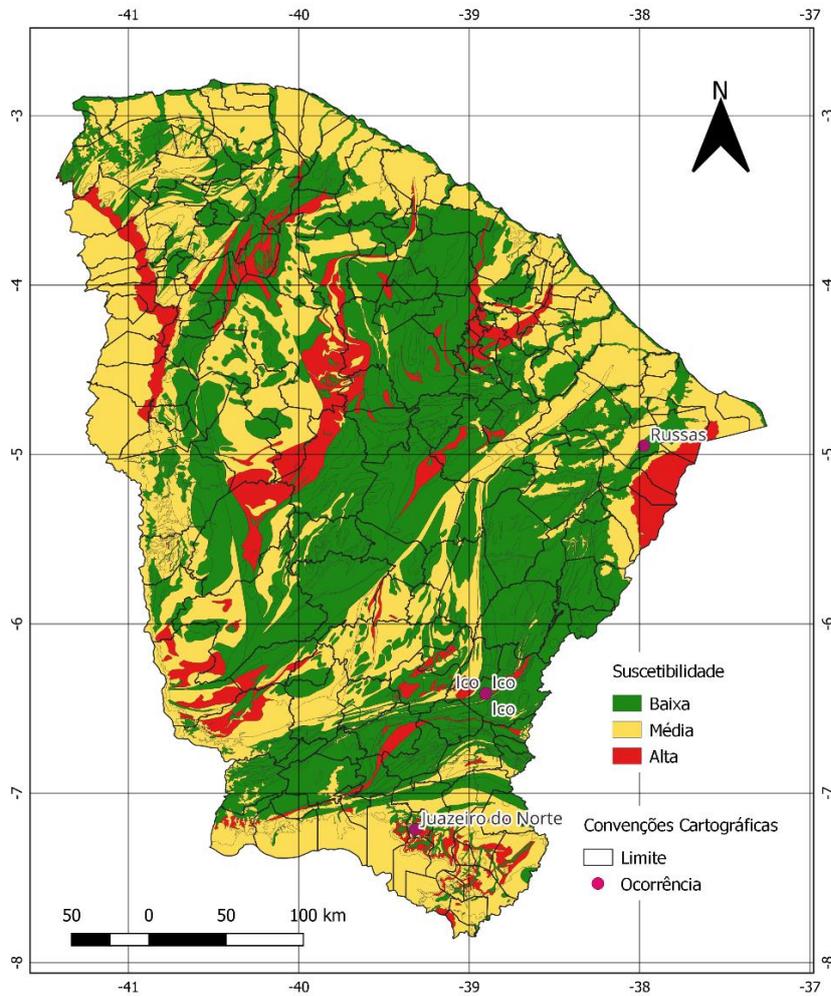
**Comentado [S2]:** Colocar as coordenadas geográficas dos pontos de ocorrência dos casos reais.

Tabela 7: Suscetibilidade à expansão e ao colapso com base na litologia e mineralogia do Ceará.

#	Cód.	Nome	Litotipo 1 (Superior)	Litotipo 2	Mineralogia	Exp.	Média Exp.	Col.	Média Col.
1	69	Cedro	Ortognaisse granítico	Pegmatito		1	1	3	3
2	122	Iara		Siltito argiloso, Conglomerado, Arenito fino, Arcóseo, Brecha cataclástica	Siltito argiloso	2	2	2	2
					Arenito fino	2		2	
					Arcóseo	2		2	
					Brecha cataclástica	2		2	
3	131	Riacho Angico Torto	Arenito arcoseano, Conglomerado, Brecha cataclástica	Rocha vulcânica, Dacito, Granito, Metarcóseo, Filito, Siltito, Argilito, Arenito	Arenito arcoseano	2	2	2	2
					Brecha cataclástica	2		2	
4	132	Cococi	Ardósia, Folhelho, Argilito	Arenito, Arenito arcoseano, Siltito, Siltito argiloso, Conglomerado polimítico	Ardósia	3	3	1	1
					Folhelho	3		1	
					Argilito	3		1	

Fonte: Autora, 2024

Figura 27: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos com base na Geologia do Ceará.

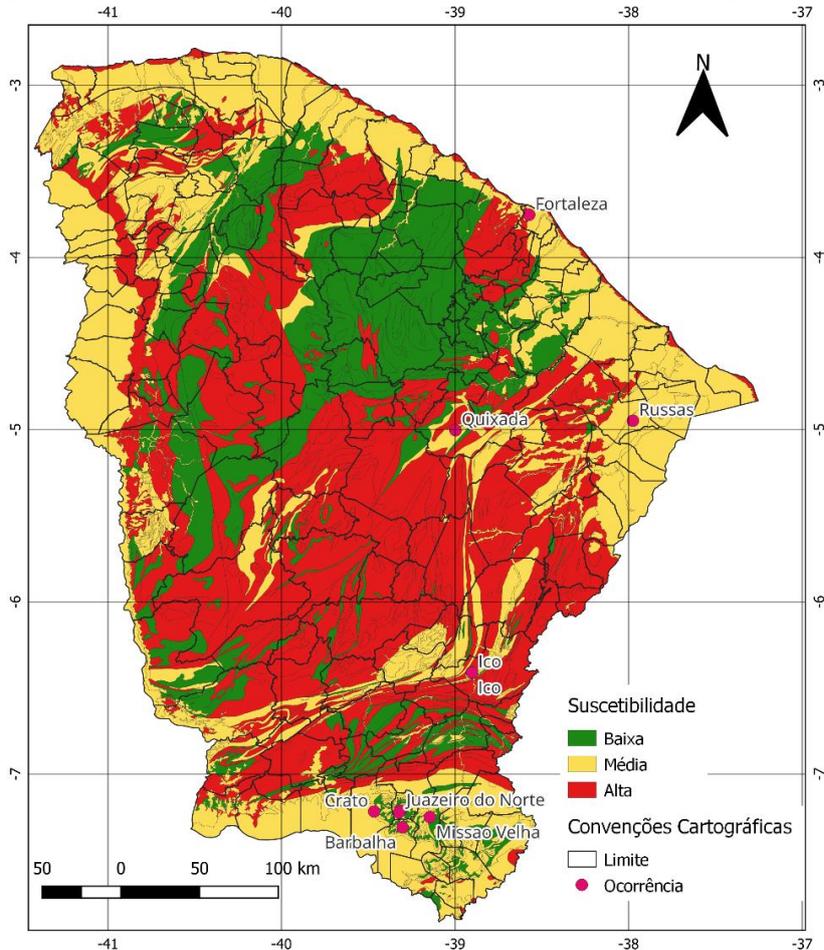


Datum: SIRGAS 2000  
 Elaboração: Leticia Moreira de Carvalho  
 Escala de impressão: 1:2.500.000

Carta derivada a partir do mapa fundamental de Geologia do Ceará (shp.) disponível na base de dados da CPRM (GeoSGB)  
 Escala Geologia (CPRM): 1:500.000.  
 Escala carta derivada: 1:250.000

Fonte: Autora (2024)

Figura 28: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis com base na Geologia do Ceará.



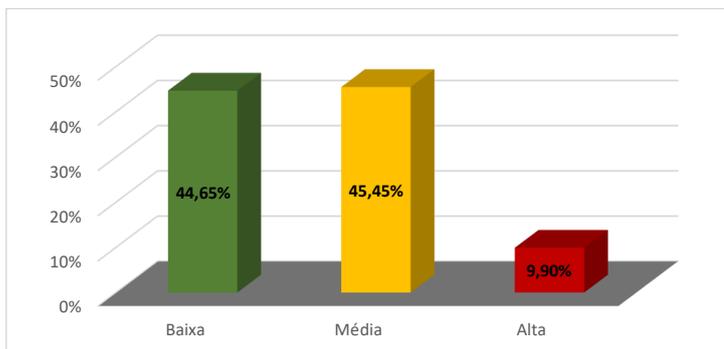
Datum: Sirgas 2000  
 Elaboração: Leticia Moreira de Carvalho  
 Escala de impressão: 1:2.500.000

Carta derivada a partir do mapa fundamental de Geologia do Ceará (shp.) disponível na base de dados da CPRM (GeoSGB)  
 Escala Geologia (CPRM): 1:500.000  
 Escala carta derivada: 1:2.500.000

Fonte: Autora (2024)

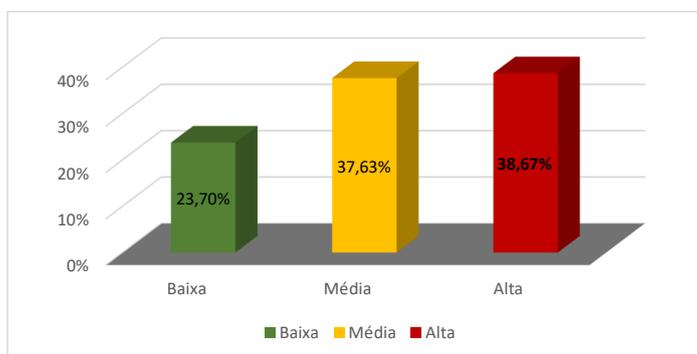
Verifica-se, portanto, pequena diferença nos valores percentuais de suscetibilidade à expansão baixa e média (0,8%), assim como na diferença dos valores de percentuais de suscetibilidade ao colapso média e alta (1,04%).

Figura 29: Graus de suscetibilidade à expansão com base na Geologia.



Fonte: Autora (2024)

Figura 30: Graus de suscetibilidade ao colapso com base na Geologia.



Fonte: Autora (2024)

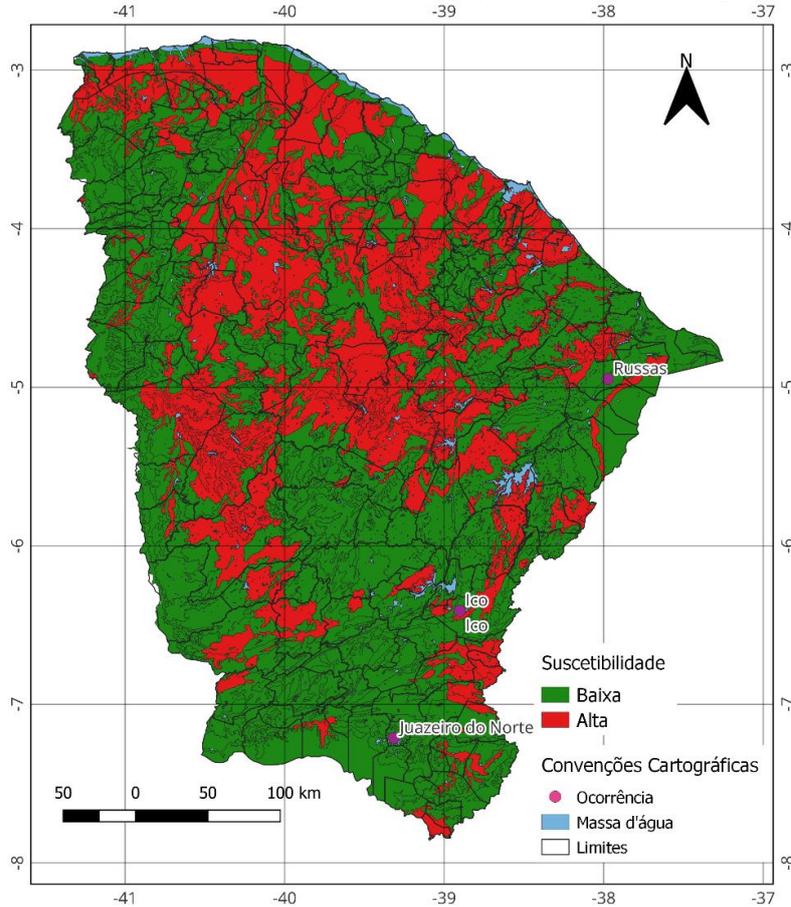
#### 4.1.2 Base Pedológica

Do mapa fundamental Pedológico do Ceará, foram obtidas duas cartas derivadas: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos Expansivos com base na Pedologia do Ceará (Figura 31) e Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis com base na Pedologia do Ceará (Figura 32).

Em relação à expansão, os solos do Ceará com baixa suscetibilidade abordaram uma área de 92.466,346 km<sup>2</sup> e para alta suscetibilidade à expansão, uma área de 53.019,763 km<sup>2</sup>. Para suscetibilidade média, não houve solo classificado.

Para os solos colapsíveis do estado do Ceará, uma área de 79.385,973 km<sup>2</sup> apresentaram baixa suscetibilidade, 56.070,624 km<sup>2</sup> de área para média suscetibilidade e 10.029,512 km<sup>2</sup> apresentaram alta suscetibilidade ao colapso.

Figura 31: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos com base na Pedologia do Ceará.

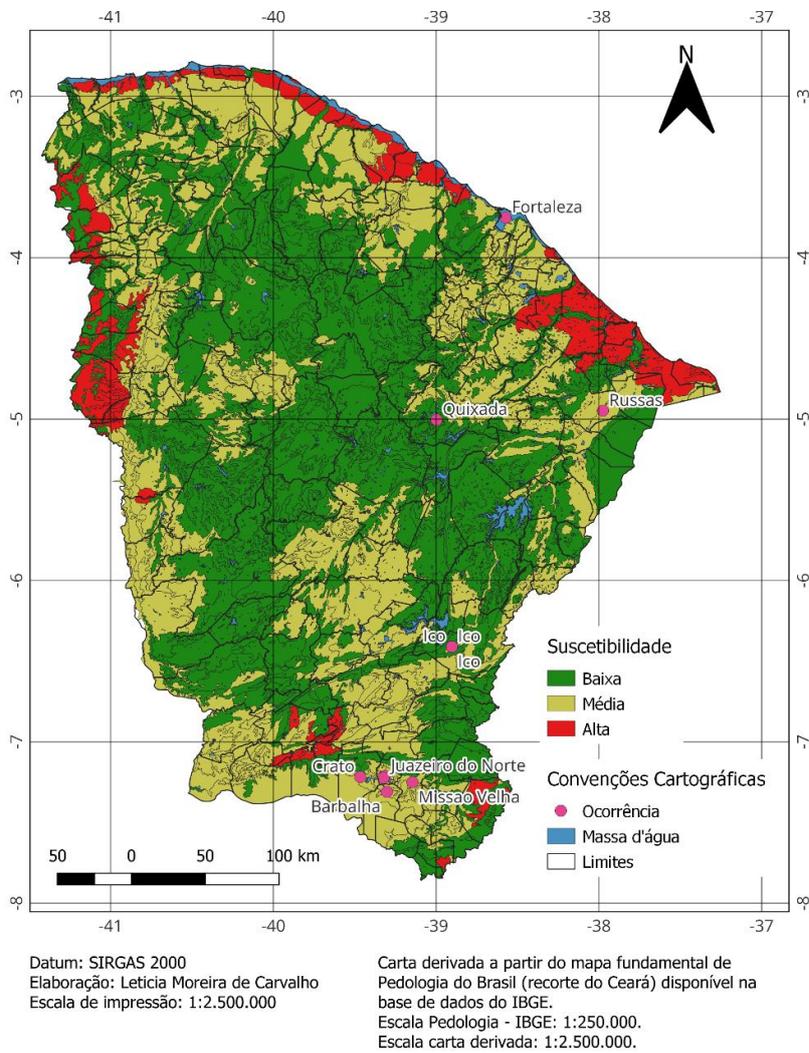


Datum: SIRGAS 2000  
Elaboração: Leticia Moreira de Carvalho  
Escala de impressão: 1:2.500.000

Carta derivada a partir do mapa fundamental de Pedologia do Brasil (recorte do Ceará) disponível na base de dados do IBGE.  
Escala Pedologia - IBGE: 1:250.000.  
Escala carta derivada: 1:2.500.000.

Fonte: Autora (2024)

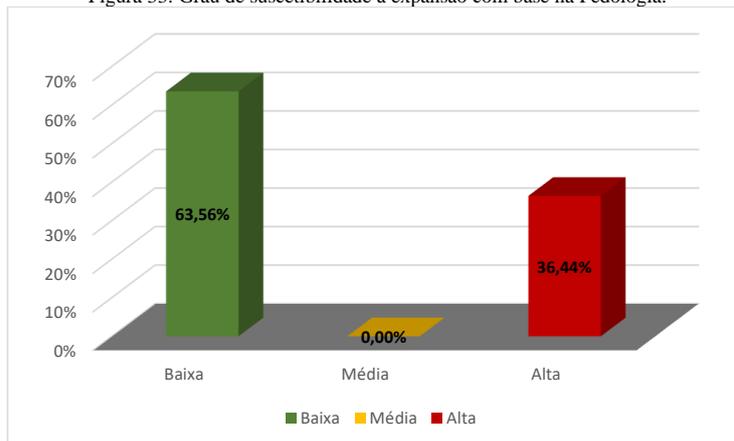
Figura 32: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis com base na Pedologia do Ceará.



Considerando apenas a Pedologia, os solos da superfície Ceará apresentam baixa (63,56%) e alta (36,44%) suscetibilidade à expansão. Não foi verificado solos com suscetibilidade média à expansão (Figura 33). Quanto ao colapso, os percentuais foram: baixa (54,57%), média (38,543%) e alta (6,89%) suscetibilidade (Figura 34).

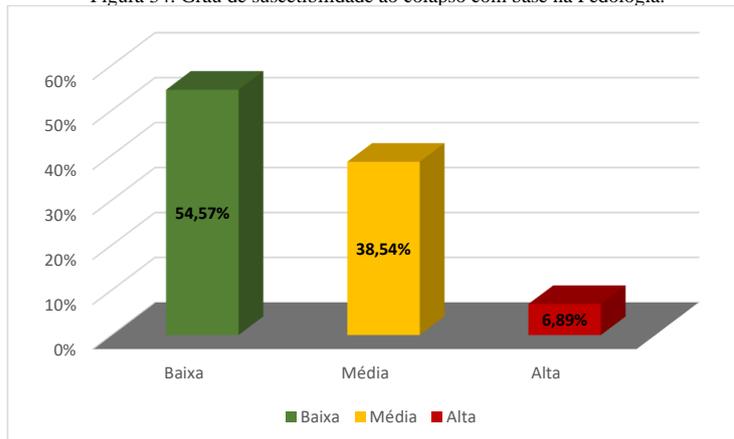
Neste caso, verifica-se diferença significativa nos valores percentuais de suscetibilidade à expansão baixa e alta (27,12%), com predominância na suscetibilidade alta. Também verifica-se diferença nos valores de percentuais de suscetibilidade ao colapso baixa e média (16,03%), predominando a suscetibilidade alta.

Figura 33: Grau de suscetibilidade à expansão com base na Pedologia.



Fonte: Autora (2024)

Figura 34: Grau de suscetibilidade ao colapso com base na Pedologia.

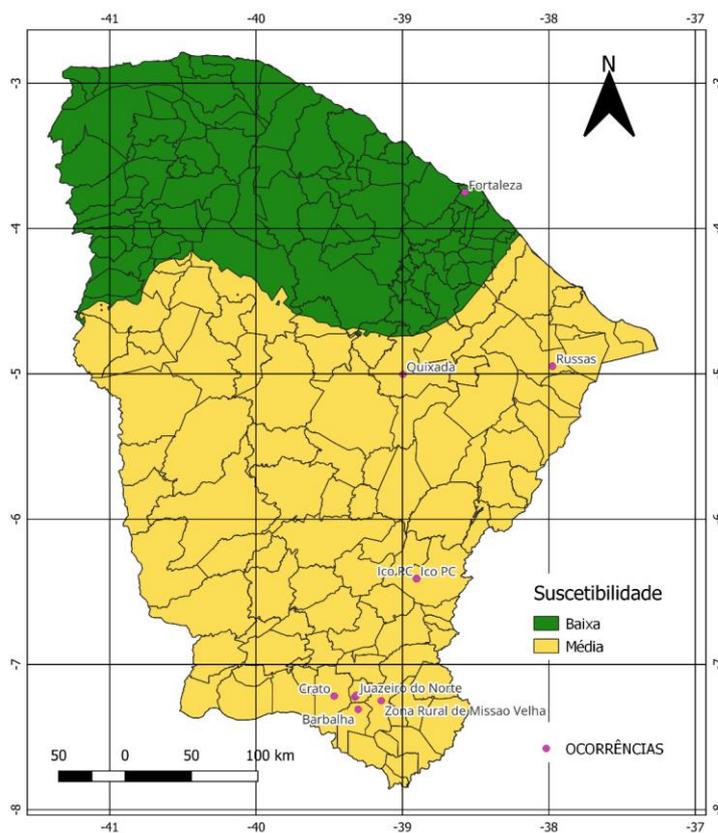


Fonte: Autora (2024)

#### 4.1.3 Base Climatológica (Classificação de Thornthwaite)

Do mapa fundamental do Clima do Ceará pela classificação de Thornthwaite, foi obtida a carta derivada: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis com base no Clima do Ceará (Figura 35). Foi observado que os solos com baixa suscetibilidade abrangem 33,33% da área total e para média suscetibilidade 66,67%, da área total. Para suscetibilidade alta, não houve solo classificado.

Figura 35: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis com base no Clima do Ceará.



Datum: SIRGAS 2000  
Elaboração: Leticia Moreira de Carvalho  
Escala: 1:2.500.000

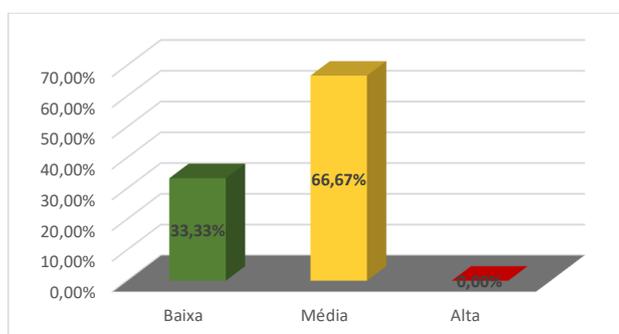
Carta Derivada a partir do mapa fundamental de Clima do Ceará pela classificação de Thornthwaite, disponível no site da Embrapa em formato shapefile.

Fonte: Autora (2024)

Considerando o Clima, os solos da superfície Ceará apresentaram baixa (33,33%) e média (66,67%) suscetibilidade à expansão e ao colapso (Figura 36). Verifica-se, portanto, uma grande predominância da média suscetibilidade abrangendo dois terços da área total do solo do Ceará.

É importante salientar que o critério de suscetibilidade para os solos do Ceará com base no Clima foi considerado tanto para solos expansivos quanto colapsíveis. Já que segue a metodologia utilizada por Amorim (2004), que definiu a suscetibilidade de cada tipologia climática. O autor classificou o clima árido e semiárido como de alta suscetibilidade, devido aos longos períodos de escassez de chuvas e ao déficit hídrico do solo. Por outro lado, os climas subúmido, úmido e superúmido foram considerados de baixa suscetibilidade, pois prevêm um excedente hídrico no solo. O clima subúmido seco foi classificado como uma condição intermediária entre os dois. O autor considerou a classificação por Thornthwaite e Mather, que também foi utilizada nesta pesquisa.

Figura 36: Grau de suscetibilidade à expansão e ao colapso com base no Clima.



Fonte: Autora (2024)

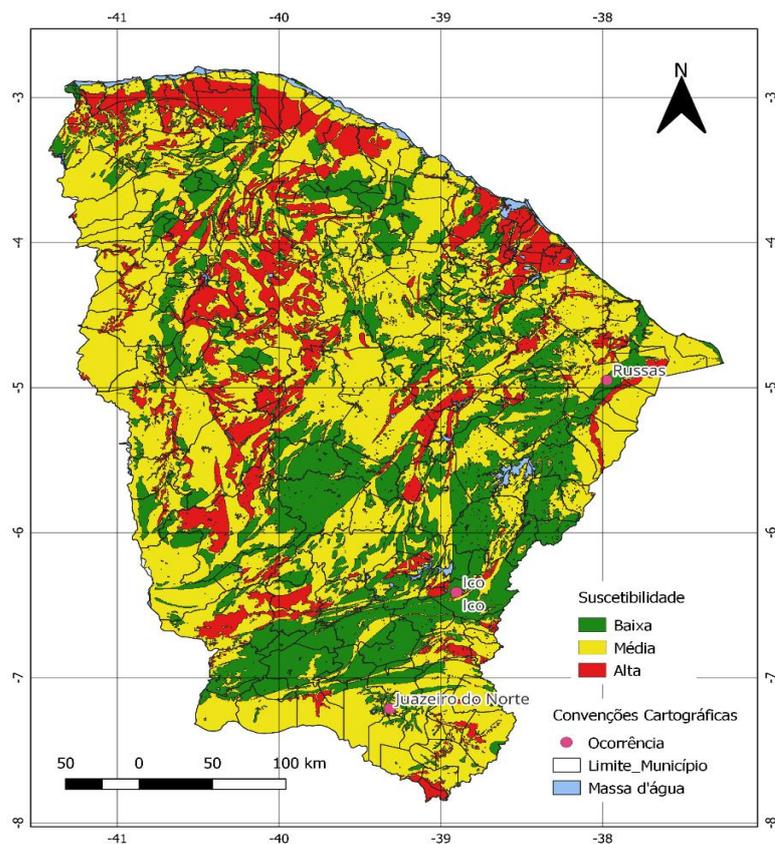
#### 4.4 Cartas interpretativas de Suscetibilidade à Ocorrência de Solos Expansivos e Colapsíveis

##### 4.4.1 Bases Pedológica e Geológica

A partir do critério ponderado de classificação, foram obtidas as cartas interpretativas de Suscetibilidade à ocorrência de Solos Expansivos (Pedologia e Geologia)(Figura 37) e de Suscetibilidade à ocorrência de Solos Colapsíveis (Pedologia e Geologia) (Figura 38) do Ceará.

Quanto à expansão foi observado que os solos com baixa suscetibilidade abrangem uma área de 39.878,116 km<sup>2</sup> enquanto os de média suscetibilidade, abrange uma área de 82.855,290 km<sup>2</sup>. Para os de alta suscetibilidade 22.662,918 km<sup>2</sup> de área compreende a suscetibilidade dos solos expansivos do Ceará.

Figura 37: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos do Ceará (Pedologia e Geologia)



Datum : SIRGAS 2000

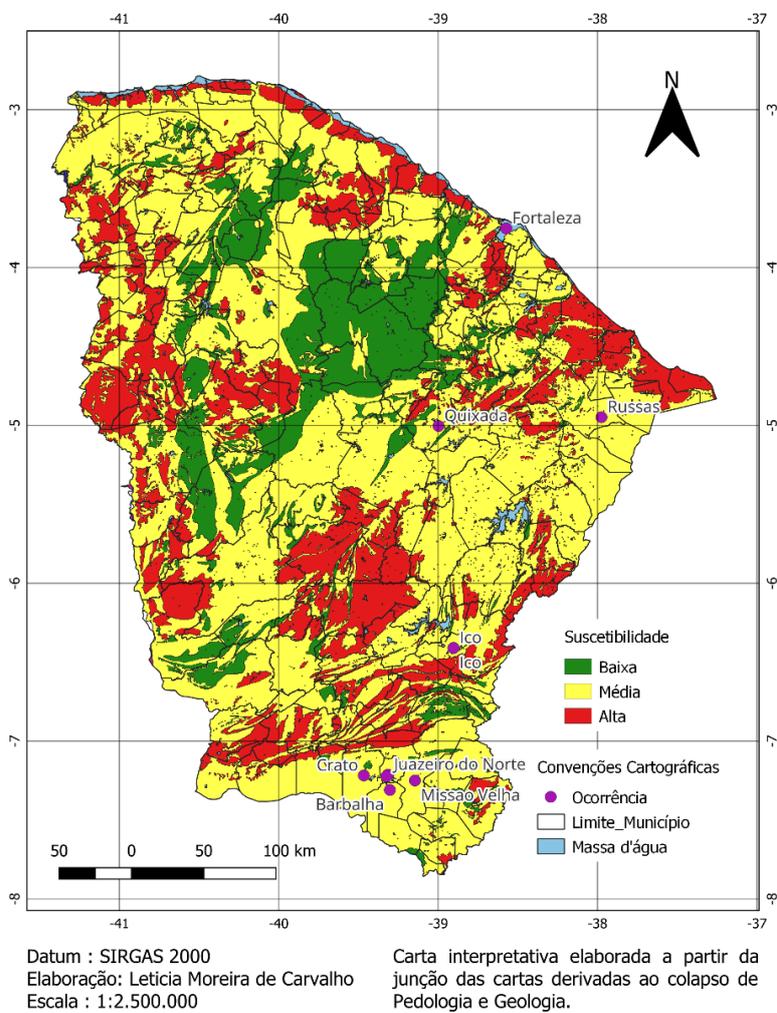
Elaboração: Leticia Moreira de Carvalho

Escala : 1:2.500.000

Carta interpretativa elaborada a partir da junção das cartas derivadas à expansão de Pedologia e Geologia.

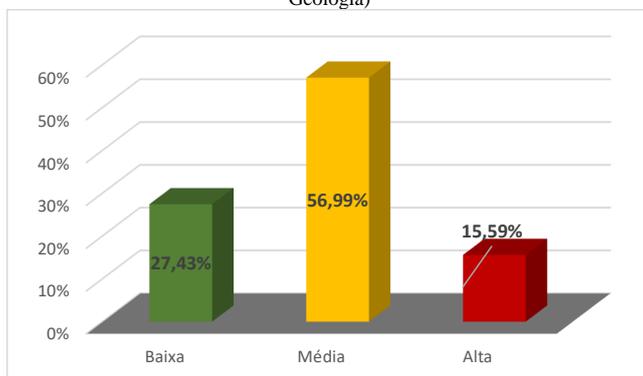
Fonte: Autora, 2024.

Figura 38: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis do Ceará (Pedologia e Geologia).



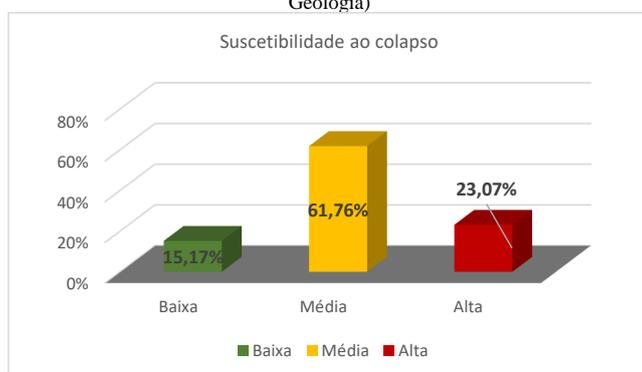
Após a junção dos mapas de Pedologia e Geologia foi possível identificar as seguintes suscetibilidades à ocorrência de solos expansivos do Ceará (Figura 39): alta (15,59%), média (56,99%) e baixa (27,43%). Enquanto a suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis do Ceará (Figura 40) apresenta alta (23,07%), média (61,76%) e baixa (15,17%).

Figura 39: Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos do Ceará em porcentagem (Pedologia e Geologia)



Fonte: Autora, 2024.

Figura 40: Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis do Ceará em porcentagem (Pedologia e Geologia)

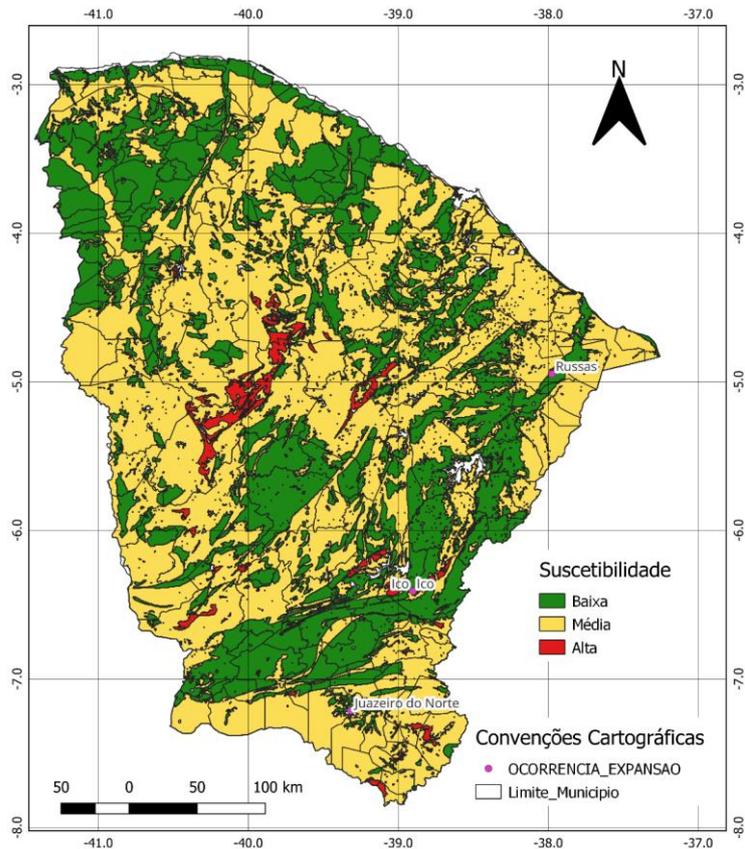


Fonte: Autora, 2024.

#### 4.4.2 Bases Geológica, Pedológica e Climatologia

A partir do critério ponderado de classificação, foram obtidas as cartas interpretativas de Suscetibilidade à ocorrência de Solos Expansivos (Pedologia, Geologia e Clima)(Figura 41) e de Suscetibilidade à ocorrência de Solos Colapsíveis (Pedologia, Geologia e Clima) (Figura 42) do Ceará.

Figura 41: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos do Ceará (Pedologia, Geologia e Clima)

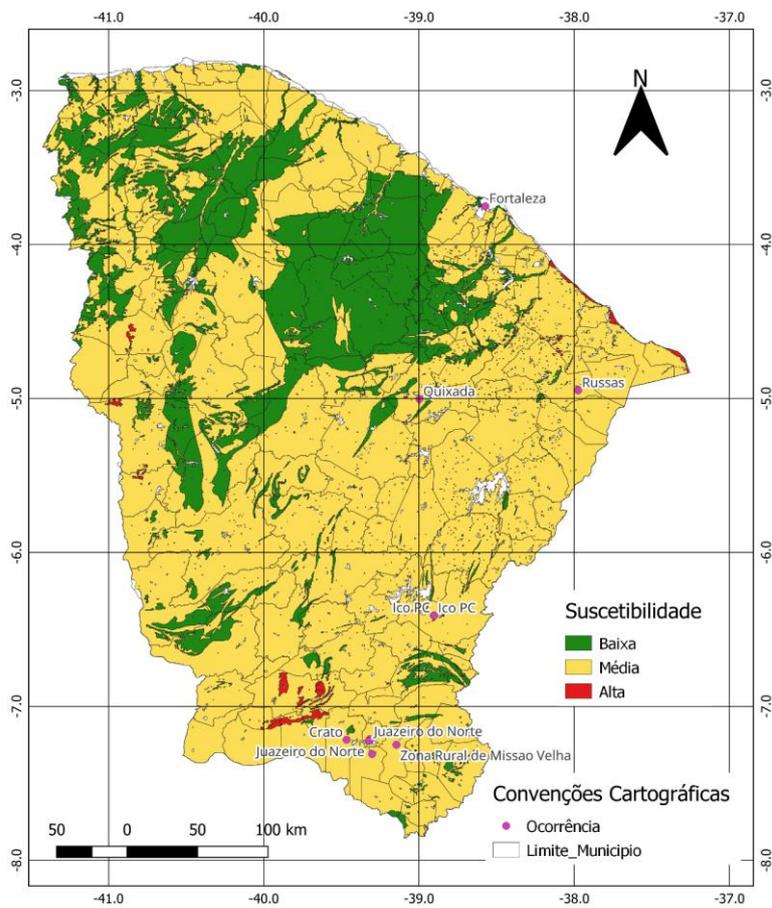


Datum: SIRGAS 2000  
 Elaboração: Leticia Moreira de Carvalho  
 Escala: 1:2.500.000

Carta interpretativa elaborada a partir da junção das cartas derivadas à expansão de Pedologia, Geologia e Clima.

Fonte: Autora (2024)

Figura 42: Carta de Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis do Ceará (Pedologia, Geologia e Clima)



Datum: SIRGAS 2000  
 Elaboração: Leticia Moreira de Carvalho  
 Escala: 1:2.500.000

Carta Interpretativa elaborada a partir da junção das cartas derivadas ao colapso de Pedologia, Geologia e Clima.

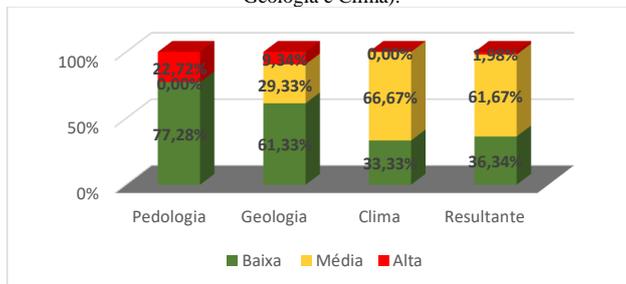
Fonte: Autora (2024)

Nas Figuras 43 e 44, são apresentados os percentuais de solos suscetíveis à expansão e colapso respectivamente, para cada carta interpretativa obtida (Pedologia, Geologia, Clima e Pedologia/Geologia/Clima).

Na carta resultante (Pedologia/Geologia/Clima) para expansão, verificou-se suscetibilidade baixa (36,34), média (61,67%) e alta (1,98%), onde é possível perceber que ao ponderar as três condicionantes, a baixa e média suscetibilidade à expansão aumentaram na resultante, enquanto a alta suscetibilidade à expansão diminuiu, contudo, a predominância da média suscetibilidade possui grande diferença de valores, se comparado a alta e baixa.

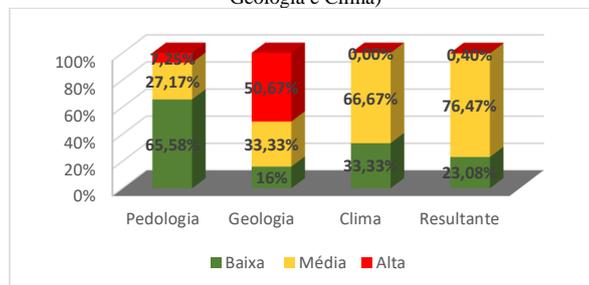
Na carta resultante (Pedologia/Geologia/Clima) para colapso, verificou-se suscetibilidade baixa (23,08%), média (76,47%) e alta (0,4%), havendo predominância na média suscetibilidade. É importante avaliar que a porcentagem de média colapsibilidade é maior do três vezes o somatório da baixa e alta suscetibilidade ao colapso juntas (23,48%). Na Pedologia, a baixa suscetibilidade ao colapso predomina e que essa classificação na resultante diminuiu, salientando a importância da Geologia e do Clima para prever o comportamento destes solos.

Figura 43: Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos do Ceará em porcentagem (Pedologia, Geologia e Clima).



Fonte: Autora (2024)

Figura 44: Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis do Ceará em porcentagem (Pedologia, Geologia e Clima)



Fonte: Autora (2024)

Na Tabela 8 tem-se um resumo dos percentuais das suscetibilidades de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis do Ceará.

Comentado [S3]: comparar com Holanda (2023)

Comentado [LM4R3]: Fazer comparação!

Tabela 8: Resumo das áreas de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis do Ceará.

Mapas	Áreas de Suscetibilidade (%)					
	Expansão			Colapso		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
Pedologia	63,56	0,00	36,44	54,57	38,54	6,89
Geologia	44,65	45,45	9,90	23,70	37,63	38,67
Clima	33,33	66,67	0	33,33	66,67	0
Pedologia + Geologia	27,43	56,99	15,59	15,17	61,76	23,07
Pedologia + Geologia + Clima	36,34	61,67	1,98	23,08	76,47	0,4

Fonte: Autora (2024)

Ao confrontar os resultados referentes à expansão, foi observado que para a carta interpretativa de Pedologia + Geologia predominou a média suscetibilidade, mostrando a influência da Geologia nessa análise. Ao adicionar o Clima às duas condicionantes, resultando na carta interpretativa (Pedologia, Geologia e Clima) houve a média suscetibilidade à expansão continuou prevalecendo, mas com valores mais altos.

De acordo com Ferreira (2008) existem dois atributos básicos, intrínseco e extrínseco, para um solo mostrar expansividade. O intrínseco está associado com a composição mineralógica, textura e estrutura. O extrínseco se relaciona com a climatologia, a hidrogeologia, a vegetação e a ocupação antrópica que são quem transmite umidade de um ponto a outro. Sendo assim, o clima pode ter interferido como um atributo extrínseco para este resultado.

Para os resultados de colapso, tem-se que a carta interpretativa de Pedologia e Geologia apresenta como predominância, a suscetibilidade média. Ao se obter a carta resultante (Pedologia, Geologia e Clima) é perceptível que houve a predominância da média suscetibilidade ao colapso concordando com a mesma suscetibilidade predominante para o Clima. Vilar e Ferreira (2015) diz que uma das principais características para a ocorrência de solos colapsíveis está relacionado a alternância de estações secas e chuvas intensas e concentradas de solos em regiões onde a evapotranspiração excede a precipitação. Ou seja, como visto no mapa de climas do

Ceará, nesta pesquisa, existe a presença de duas tipologias climáticas que apresentam características distintas, o que pode ter sido de grande importância para manter uma grande porcentagem de média suscetibilidade ao colapso.

Vale salientar que ainda segundo Vilar e Ferreira (2015), o processo de expansão em comparação com o de colapso, é bem mais complexo, rege causas físico-químicas e que, além do aumento de volume, conduz outro produto, a tensão de expansão.

#### **4.3 Pontos de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis no Ceará**

Para os solos expansivos, foram detectados na bibliografia, pontos de ocorrência, nas cidades de Juazeiro do Norte, Russas e Icó. De acordo com a carta interpretativa de Expansão (Figura 41) considerando as três condicionantes (Pedologia, Geologia e Clima), a ocorrência de Juazeiro do Norte apresenta baixa e média suscetibilidade à expansão.

Na pesquisa de Alexandre et. al (2020) as duas amostras estudadas apresentaram comportamento de expansão quando inundada a 5 KPa, entretanto, no artigo científico não é reportado o local exato da ocorrência desse solo, sendo apenas mencionada a cidade de Juazeiro do Norte. Sendo assim, não é possível detectar se as amostras estão localizadas num ponto de baixa ou média expansão.

Os solos da cidade de Icó apresentaram no mapa, baixa e média suscetibilidade à expansão, concordante com os resultados do estudo de Chagas, Moura e Carneiro (2017) em que foi constatado um solo potencialmente expansivo.

Para a cidade de Russas, os solos apresentam baixa e média suscetibilidade à ocorrência de expansão, o que condiz, com os resultados encontrados por Diógenes (2021), onde de acordo com o critério de Dakshanamurthy & Raman (1973), o solo foi classificado como baixo potencial de expansão e de acordo com o critério de Chen (1965), o solo se apresentou como baixo e médio potencial de expansão. Para o Limite de Plasticidade pelo critério de Seed *et al.* (1962) o grau de expansibilidade categorizou-se entre baixo e médio e no ensaio endométrico de acordo com o critério de Seed *et al.* (1962) e o de Vijayvergiya & Ghazzaly (1973), concluiu-se que o solo estudado possuía grau de expansibilidade média.

Para os solos colapsíveis, foram detectados na bibliografia, pontos de ocorrência, nas cidades de Juazeiro do Norte, Russas, Icó, Fortaleza, Quixadá, Barbalha, Crato e Missão Velha. Na carta interpretativa para suscetibilidade ao colapso (Figura 42) foram detectadas média suscetibilidade ao colapso em Icó, Russas, Missão Velha, Crato, Barbalha e Juazeiro do Norte. Em Fortaleza não foi detectado suscetibilidade na carta e Quixadá apresentou baixa suscetibilidade à expansão.

As pesquisas desenvolvidas na cidade de Icó por Chagas, Moura e Carneiro (2017) e Chagas *et. al* (2020) concluíram que o solo estudado era condicionado ao colapso, tendo como solução a compactação.

Para Russas, de acordo com Diógenes (2021) o solo é potencialmente colapsível, concordante com o encontrado na carta interpretativa de suscetibilidade ao colapso.

Em Missão Velha, um solo do trecho da obra do Cinturão das Águas do Ceará (CAC), localizado na zona rural do município de Missão Velha, foi estudado por Barbosa, Guilherme e Bandeira (2015). Os autores verificaram através de ensaios de laboratório e da utilização do Expansocolapsômetro em campo que o solo estudado é colapsível, confirmando assim a suscetibilidade apresentada na carta interpretativa de suscetibilidade ao colapso.

Para Costa *et. al* (2020), o solo analisado na zona rural de Crato, apresentou comportamento não colapsível, o que difere do resultado encontrado no mapa. Porém, o autor ressalta que o solo se apresentou heterogêneo na amostragem em bloco, indicando a importância de uma investigação geotécnica complementar nas porções mais friáveis do solo, que apresenta indícios de potencialidade ao colapso. Se analisado o mapa, de fato a cidade do Crato possui solo com suscetibilidade baixa e média.

Nas cidades de Barbalha (Guilherme *et. al*, 2016) e Juazeiro do Norte (Bandeira *et. al*, 2014, Rodrigues *et. al*, 2020, Alexandre *et. al*, 2020) foram detectados solos colapsíveis. Enquanto, em Fortaleza, Almeida (2018) concluiu que o solo não era colapsível. Já na cidade de Quixadá, Neto *et. al* (2018) estudou o solo de uma barragem experimental, onde foi detectado que o colapso ocorre nos espaldres do maciço, mas que o núcleo da barragem não colapsa.

Na Tabela 9, são confrontados os resultados obtidos nos mapas confeccionados quanto à suscetibilidade dos solos e o que foi encontrado na bibliografia. É observado

que a quantidade de ocorrência, bem como, de estudos sobre solos colapsíveis no Ceará é maior que para solos expansivos.

Os pontos de ocorrência de solos expansivos quando inseridos na carta interpretativa resultante se mostraram como de Baixa e Média expansão.

Tabela 9: Ocorrências de Solos Expansivos e Colapsíveis (Bibliografia versus Carta Interpretativa)

<b>Autor</b>	<b>Local</b>	<b>Solo (Bibliografia)</b>	<b>Suscetibilidade na carta (Expansão)</b>	<b>Suscetibilidade na carta (Colapso)</b>
Neto (2013)	Quixadá	colapso	Alta	Baixa
Melo (2014)	Juazeiro do Norte	colapso	Não detectável	Não detectável
Barbosa et. al (2015)	Missão Velha	colapso	Média	Média
Chagas, Moura e Carneiro (2016)	Icó	Colapso	Baixa	Média
Guilherme et. al (2016)	Barbalha	colapso	Baixa/Média	Média
Xavier (2018)	Juazeiro do Norte	colapso	Baixa/Média	Média
Alexandre et. al (2020)	Juazeiro do Norte	colapso / expansão	Baixa/Média	Média
Bandeira et al. (2020)	Crato	colapso	Média	Média
Diógenes (2021)	Russas	Expansão	Baixa	Média
Rodrigues et. al (2022)	Juazeiro do Norte	colapso	Baixa/Média	Média

Fonte: Autora, 2024.

Sugiro colocar um banco de dados dos solos colapsíveis e expansivos no apêndice

**Comentado [S5]:** Sugiro colocar um banco de dados dos solos colapsíveis e expansivos no apêndice  
Revisitar o mapa de clima as conclusões.

**Comentado [LM6R5]:** Falta fazer esse banco de dados!

## 5. CONCLUSÕES

Estão presentes nesse capítulo as principais informações obtidas a partir dos mapas confeccionados nesta pesquisa.

Os resultados obtidos nesta pesquisa contribuem para o planejamento urbano e implantação de obras civis no estado do Ceará

### 5.1. Percentuais de solos da superfície Ceará a partir das cartas interpretativas

Considerando a base Geológica, os percentuais de suscetibilidade à expansão foram: baixa (44,65%), média (45,45%) e alta (9,90%). Quanto à suscetibilidade ao colapso, os percentuais foram: baixa (23,70%), média (37,63%) e alta (38,67%) .

Na Pedologia, os percentuais de suscetibilidade à expansão foram: baixa (63,56%) e alta (36,44%). Não foi verificado solos com suscetibilidade média. Os percentuais de suscetibilidade ao colapso foram: baixa (54,57%), média (38,543%) e alta (6,89%).

Quando ao Clima, os solos apresentam baixa (33,33%) e média (66,67%) suscetibilidade à expansão e colapso. Não houve solo com suscetibilidade alta.

Na carta Pedologia/Geologia os percentuais de suscetibilidades à ocorrência de solos expansivos foram: alta (15,59%), média (56,99%) e baixa (27,43%), enquanto a suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis foram: alta (23,07%), média (61,76%) e baixa (15,17%).

Na carta resultante (Pedologia/Geologia/Clima) para expansão, verificou-se suscetibilidade baixa (36,34%), média (61,67%) e alta (1,98%). Ao ponderar as três condicionantes, a baixa e média suscetibilidade à expansão aumenta na resultante, comprovando que a probabilidade entre Pedologia, Geologia e Clima é de grande importância para definir a expansividade do solo, visto que a quantidade de solos com alta expansão, diminui.

Na carta resultante (Pedologia/Geologia/Clima) para colapso, verificou-se suscetibilidade baixa (23,08%), média (76,47%) e alta (0,4%). A porcentagem de média colapsibilidade é maior do que baixa e alta suscetibilidade ao colapso juntas. Na Pedologia, a baixa suscetibilidade ao colapso predomina e que essa classificação na

resultante diminui, salientando a importância da Geologia e do Clima para prever o comportamento destes solos.

## **5.2. Comparação dos resultados do mapeamento com pontos de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis no Ceará**

Sobre os locais de ocorrência, ao se comparar o mapa com a literatura para expansão, a cidade de Icó e Russas confirma fielmente a suscetibilidade, em Juazeiro do Norte, por não ser possível a localização exata, não se pode afirmar ao certo se há ou não expansão.

Para o colapso, Icó, Missão Velha, Barbalha e Crato tiveram resultados concordantes ao se comparar a suscetibilidade nos mapas com a literatura.

Os resultados mostraram que a quantidade de ocorrência, bem como, de estudos sobre solos colapsíveis no Ceará é maior que para solos expansivos.

Os pontos de ocorrência de solos expansivos quando inseridos na carta interpretativa resultante se mostraram como de Baixa e Baixa / Média expansão.

## **6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

- No mapa de Geologia, acrescentar ocorrência de poços para se obter maior confiabilidade nos resultados;
- Realizar ensaios de campo nas localizações onde foi encontrado média e alta suscetibilidade dos solos expansivos e colapsíveis de acordo com os mapas;
- Comparar os resultados obtidos nesta pesquisa com as pesquisas que utilizaram a mesma condicionante para o semiárido e o Brasil;
- Utilizar inteligência artificial para os solos do Ceará e comparar com os resultados;
- Criar um banco de dados de solos expansivos e colapsíveis para o estado do Ceará.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, Cícero Cordeiro. **Estudo da Expansibilidade de um Solo de Fundação de um Conjunto Residencial em Juazeiro do Norte-CE**. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Juazeiro do Norte. **Congresso**. São Paulo: Sbm, 2020.

Al Rawas, A. A. 2000. State-of-the-art review of collapsible soils. Sultan Qaboos University, 5, 115-135. <https://doi.org/10.24200/squjs.vol5iss0pp115-135>.

Alshaba, A. A.; Abdelaziz, T. M.; Ragheb, A. M. 2018. **Treatment of collapsible soils by mixing with iron powder**. Alexandria Engineering Journal, 57, 3737-3745. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.019>.

AMORIM, S.F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsáveis do estado de Pernambuco (SIGSEC-PE)**, 263 f. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

ANDRADE, Ricardo Fernandes de. **Mapeamento geotécnico preliminar em escala de semi-detalle (1:25.000) da área de expansão urbana de Uberlândia - MG**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

AQUINO, Amanda Evelyn Barbosa de. **Contribuição à cartografia geotécnica no município de Teresina-PI: cartas de suscetibilidade à ocorrência de solos problemáticos e prática de fundação com uso de geoprocessamento**. 2020. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

AQUINO, A. E. B.; FERREIRA, S. R. M. **Análise Geotécnica e Caracterização Geomecânica de um Solo Expansivo de Teresina-PI**. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. **Anais [...]**. Campinas, Galoá, 2022.

ATAIDE, Stive Osca Falcão de. **Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia**. 2017. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós -Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

ARAGÃO, C. J. G.; MELO, A. C. 1982. **Fundações rasas em solo colapsível um caso no semiárido de Pernambuco**. Anais Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia de Fundações, Olinda, PE, Brasil, ABMS, pp. 19-40.

ASHAYERI, I.; YASREBI, S. Free-swell and swelling pressure of unsaturated compacted clays; experiments and neural networks modeling. **Geotechnical and Geological Engineering**, 27 (1), 137-153. 2009.

Ayadat, T.; Hanna, A. 2005. Encapsulated stone columns as a soil improvement technique for collapsible soil. *Ground Improvement*, 9, 4, 137-147.

AYALA, J.F., GIJON, M. F., MOZO, C. O. e RODRIGUEZ J. L. S. **Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Argilas Em España a Escala 1:1.000.000**. Série: Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de España. Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Públicas. España, Madrid, 1986.

BANDEIRA, Ana Patrícia Nunes *et al.* RECALQUE POR COLAPSO DO SOLO E SUAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS. In: XIII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas: Crato – CE. **Congresso[...]** Crato – CE, 2017. p. 303-319.

BANDEIRA, Ana Patrícia Nunes *et al.* ESTUDO DE UM SOLO COLAPSÍVEL NO MUNICÍPIO DO CRATO-CE. In: PIRES, Plínio Ferreira. **ENGENHARIA E GEOTECNIA: PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS**. 3. ed. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, 2020. p. 415-426.

BARBOSA, Higo. **Análise da Colapsibilidade do Solo de um Trecho do Projeto Cinturão das Águas do Ceará**. In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS AT: FORTALEZA-CE, 8., 2015, Fortaleza. **Congresso**. Fortaleza: Researchgate, 2015. p. 1-9.

BARBOSA, Valquiria. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal. Recife, 2013**. 111 f. Dissertação (mestrado) - UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2013.

BATISTA, Vanessa de Souza. **potencial do uso de resíduo de mineração de rocha calcária para estabilização de solos expansivos**. 2021. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/Rn, 2021.

BORGES, Jese John da Silva. FERREIRA, Silvio Romero de Melo. AMORIM, Samuel França. Utilização do sistema de informação geográfica para identificar solos colapsíveis na região do semiárido brasileiro. **Journal of Environmental Analysis and Progress** V. 08 N. 02 (2023) 140-155.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. *et al.* (Orgs.) (2015). Solos não saturados no contexto geotécnico. **ABMS**, São Paulo, cap. 15: 415 - 436.

CÂMARA, Gilberto *et al* (org.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. 345 p.

CARDOSO DE FREITAS, M. **Avaliação da técnica de melhoria de solos colapsíveis por meio de colunas de solo laterítico compactado**. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação e área de concentração em geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

CARVALHO, M. S.; PINA, M. F. de.; SANTOS, S. M. dos. **Conceitos básicos de Sistema de Informação Geográfica e Cartografia aplicados à saúde**. Brasília: Organização Pan-americana da Saúde/Ministério da Saúde, 2000. 124 p.

CAVALCANTE, E. H., CAVALCANTI JÚNIOR, D. de A., SANTOS, W. J., & SOUZA NETO, J. B. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo de Sergipe. In: II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos - II Geojovem, Nova Friburgo/RJ. 2006.

CHAGAS, Gleiber da Silva; MOURA, Alfran Sampaio; CARNEIRO, Andressa de Araújo. UTILIZAÇÃO DA COMPACTAÇÃO PARA REDUÇÃO DO POTENCIAL DE COLAPSO/EXPANSÃO DE UM SOLO SILTO ARGILOSO DE MASSAPÊ DA CIDADE DE ICÓ - CE. *Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, Icó-Ce, v. 13, n. 1, p. 64-75, ago. 2016.

CHAGAS, Gleiber da Silva; MOURA, Alfran Sampaio; CARNEIRO, Andressa de Araújo. Avaliação da compactação como melhoramento de um solo silto, argiloso, colapsível, um partidor da realização de ensaios oedométricos e provas de carga diretas. *Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo*, vol. 6, n. 1, p. 3-19, Janeiro-Junho 2019.

Christ, C. E. 2014. **Mapeamento de áreas suscetíveis ao colapso na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 174p.

CHRIST, Caroline Ester. **Mapeamento geotécnico e análise da suscetibilidade a deslizamentos na ilha de Santa Catarina**. 2019. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

CINTRA, J. C. A. *Fundações em solos colapsíveis*. São Carlos: Serviço Gráfico da EESC/USP, São Carlos, 116 p., 1998.

CONSTANTINO, Camila de Souza. **Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz**. 2018. 98f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

COSTA NUNES, A.J., VASCONCELOS, E.M., PANDOLFI, R.M. "Ocorrências e propriedades de engenharia de solos expansivos na área do grande Recife", In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, v.2, pp. 193-209, Olinda/Recife, 1982.

CPRM - Campanha de Pesquisa de Recursos Minerais (2021). **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Ceará**. DNPM, GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ.

D'ALGE, J. C. L. Cartografia para Geoprocessamento. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Conceitos básicos em Ciência da Geoinformação**. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 32 p.

DIÓGENES, Rafael do Amaral. **Estudo da expansividade de solos: um estudo de caso na UFC campus Russas**. 2021. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.

DIVISÃO regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 82 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf> . Acesso em: 12 mar. 2023

DUARTE, P. A. **Fundamentos de Cartografia**. 3. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006. 208 p.

FARIA, Daniela Girio Marchiori. **Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica**. 2011. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós - Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

FERREIRA, S.R.M. (1993). "Aplicações da Classificação e Levantamentos Pedológicos aos Estudos dos Solos Colapsíveis e Expansivos". Revista Ciência e Tecnologia na Universidade Federal de Uberlândia. Vol. 1. pp. 119-136.

FERREIRA, S. R. M. Classes de Solos com Potencialidade de Apresentarem Solos Colapsíveis e Expansivos. **In.:** XXIII Congresso Brasileiro de Ciência dos Solos, 1991, Porto Alegre - RS. XXIII Congresso Brasileiro de Ciência dos Solos, 1991. v. 1. p. 135-135.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação**. 379p. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

FERREIRA, S.R.M. (1999). "Mapa de Risco a Colapsibilidade e Expansividade de Solos do Estado de Pernambuco - Geotecnia Ambiental". Relatório Técnico do CNPQ, 100p.

FERREIRA, S.R.M. (1988). "Solos especiais – colapsíveis, dispersíveis, expansíveis". Relatório Final CNPQ, 156p.

FERREIRA, S.R.M., "Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil". In: Simpósio Brasileiro De Solos Não Saturados, 7, v.2. pp. 593- 619, Salvador, 2008.

FERREIRA, S. R. M. AMORIM, S. M. VAREJÃO-SILVA, M. A. Tecnologia da geoinformação aplicada aos estudos de solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2008. Recife.

FORNASA, Thaynara Loch. **Mapeamento geológico-geotécnico e análise de suscetibilidade a movimentos de massa em Braço do Norte – SC.** 2018. 142 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

**FOSSGIS - REDESCOBRINDO AS GEOTECNOLOGIAS.** Brasil: Fossgis, 2011.

FREITAS, Marta Lúcia Rolim de Almendra. **Comportamento geomecânico de um solo colapsível de Petrolina-PE avaliado por meio de ensaios de campo e laboratório.** 2017. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

Futai, M.M.; Suzuki, S. (2006). Curvas de retenção de água e funções de permeabilidade de solos tropicais naturais. **COBRAMSEG:** Curitiba. ABMS.

GABERTI, M. M.; ROBAÍNA; L. E. de S. Análise da Suscetibilidade a Escorregamentos a partir do Estudo do Relevô, com Apoio de SIG, na Bacia do Arroio Veado, Rio Grande do Sul. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Campinas: Instituto de Geociências – Unicamp, jul. de 2017.

Gao, C.; Du, G.; Liu, S.; He, H.; Zhang, D. 2021. The microscopic mechanisms of treating collapsible loess with vibratory probe compaction method. *Transportation Geotechnics*, 27, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100492>.

Gitirana Junior, G. F. N., Camapum de Carvalho, J., Ferreira, S. R. M., & Mascarenha, M. M. A. (2012). O comportamento de solos não saturados submetidos à infiltração. In: Carvalho, J. C., Gitirana Junior, G. F. N., & Carvalho, E. T. L. (Org). *Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais*, 157-180. Brasília, Brasil: Faculdade de Tecnologia.

GOMES, R. L.; MARQUES, E. A. G.; FRANCO, G. B. The waste disposal suitability of Almada River Watershed. **Eng Sanit Ambient** | v.22 n.4 | jul/ago 2017 | 731-747. DOI: 10.1590/S1413-41522017157490.

Gonçalves, G. G. G. **Procedimentos metodológicos para determinação da Fragilidade ambiental de bacias hidrográficas.** 2010. 130 f. Dissertação ( Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal. Universidade Federal Da Grande Dourados, Dourados, Mato Grosso Do Sul. 2010.

GUIMARÃES NETO, J. S. F. (1997). **Análise de Alguns Fatores que Influenciam a Colapsibilidade dos Solos Devido à Inundação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 107 f.

GUILHERME, Laís Chaves. Avaliação do potencial de colapso do solo de Barbalha. 2015. **Artigo – UFCA. EBOOK**, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, 2015.

GUILHERME, Laís Chaves *et al.* Avaliação do potencial de colapso de um solo do município de Barbalha-CE. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 8., 2016, Juazeiro do Norte. **Congresso**. Minas Gerais: Abms, 2016. p. 1-7.

GRIM, R. E. Applied clay mineralogy. McGraw-Hill Publ. Company Ltda, New York, 1962.

Haeri, S. M.; Valishzadeh, A. 2021. Evaluation of Using Different Nanomaterials to Stabilize the Collapsible Loessial Soil. **International Journal of Civil Engineering**, 19, 5, 583-594. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00583-8>.

HOLANDA, Maria Júlia de Oliveira. **Solos colapsíveis e expansivos no Brasil: classificação da suscetibilidade de ocorrência aplicando redes neurais artificiais**. 2022. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Banco de Dados de Informações Ambientais. <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html>>. Acesso em abril de 2023.

Jefferson, I.; Rogers, C.; Evstatiev, D.; Karastanev, D. 2005. Treatment of metastable loess soils: Lessons from Eastern Europe. Elsevier GeoEngineering Book Series, 3, 723-762. [https://doi.org/10.1016/S1571-9960\(05\)80028-X](https://doi.org/10.1016/S1571-9960(05)80028-X).

Lawton, E. C.; Fragaszy, R. J.; Hetherington, M. D. 1992. Review of Wetting-Induced Collapse in Compacted Soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118, 1376-1394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:9\(1376\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:9(1376)).

LEITE, Marcos Esdras; BRITO, Jorge Luis Silva. Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento do uso do solo urbano e de assentamentos ilegais em Montes Claros-MG. **Geosul**, Florianópolis, v. 26, p. 99-128, jul. 2011.

LIMA, T. L. da S.; RIBEIRO JUNIOR, I. Estudo de Caso com Amostras Indeformadas e Amostras Compactadas em Solos Colapsíveis no Município de Primavera do Leste – MT. *XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2012*, Porto de Galinhas, 2012.

LÔBO NETO, José Benevides. **Um estudo experimental e numérico de solos compactados colapsíveis: aplicação em uma pequena barragem de terra**. 2013. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós -Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

LOLLO, J. A. (Org). **Solos colapsíveis: identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2008,262 p.

Marinho, R. P. 2018. **Melhoramento de solo colapsível e expansivo de Santa Maria da Boa Vista-PE**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil. 114p.

MEDEIROS, Cleyber Nascimento de et. al. Ceará em mapas: informações georreferenciadas e especializadas para os 184 municípios cearenses: infraestrutura. Fortaleza, [entre 2007 e 2010]. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo4/44.htm>. Acesso em 11 mar.2023.

MENDONÇA, Marcos Barreto da. **Comportamento de solos colapsíveis da região de Bom Jesus da Lapa - Bahia**. 1990. 281 f. Tese (Doutorado) - Curso de Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MENDONÇA NETO, H. C. (2010). **Análise do comportamento do colapso de um solo colapsível utilizado em canal de irrigação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 100p.

MELO, Carlos Ernesto de *et al.* Estudo do colapso dos solos para dimensionamento de fundações superficiais. In: xvii congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, 17., 2014, Juazeiro do Norte. **Congresso**. Goiânia: Geojuvem, 2014. p. 1-6.

MESQUITA, P. B. **Cartografia Geotécnica para Análise de Suscetibilidade e Risco a Movimentos de Massas e Erosão Entorno de Rodovias**. Monografia de Projeto Final, 2019. 132 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF.

MIRANDA, J. G. de. **Mapeamento geotécnico e estudo da suscetibilidade à erosão na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra (MT), escala 1:100.000. 2005**. Tese (Doutor em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Mudança de uso do solo na bacia do rio vieira, em Montes Claros/MG. Minas Gerais: Revista Brasileira de Geografia Física, 2011.

MONTEIRO, António Figueiredo. **Modelação de um SIG para a Cartografia Geotécnica com recurso a plataformas de código aberto e livres. Área urbana da Guarda**. 2020. 311 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2020.

MUNIZ, L. F.; PEREIRA, J. M. R.; XIMENES JÚNIOR, C. L.; STUDART, T. M. C. **Classificação climática para o Estado do Ceará utilizando distintos sistemas de caracterização**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - SBRH, XXII., Florianópolis, Santa Catarina Brasil. Anais [...] Florianópolis, Santa Catarina, 2017.

NASCIMENTO, R. L. X. (org.). **CADERNO DE CARACTERIZAÇÃO ESTADO DO CEARÁ**. Brasília: Codevasf, 146 p., 2022.

NEW YORK STATE DIVISION OF HOMELAND SECURITY AND EMERGENCY SERVICES (NYS DHSES). New York State Standard Multi-Hazard Mitigation Plan Draft, Section 3.13: Land Subsidence and Expansive Soils Hazard. 2014. Disponível em: Acesso em 28/12/2023.

NOÉ, Yanina *et al.* Sistemas de Información Geográfica com Qgis 2.x. Salta, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, mai. de 2014. 173 p. Disponível em: Acesso em: 12 dez. 2015.

OLIVEIRA, Cíntia Magda Gabriel de. **“Carta de risco de colapso de solos para a área urbana do município de Ilha Solteira – SP”**. 2002. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2002.

OLIVEIRA, A. G. d. S.; JESUS, A. C.; MIRANDA, S. B. Estudo geológico-geotécnico dos solos expansivos da região do recôncavo baiano. II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos-II Geojovem, Nova Friburgo/RJ. 2006.

OLIVEIRA, Bruno Rodrigues de. **Cartografia geotécnica de grande escala: estudo de caso setor habitacional asa taquaricartografia geotécnica de grande escala: estudo de caso setor habitacional asa Taquari**. 2018. 160 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

OLIVEIRA JÚNIOR, Rômulo Fontoura de *et al.* Avaliação da Expansibilidade do Solo de Agrestina-PE e sua Substituição na Base de uma Fundação Superficial. In: 9º SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 9., 2019, São Paulo. **Seminário**. São Paulo: Abef, 2019. p. 1-8.

PAIVA, Sergio Carvalho de; LIMA, Márcia Alves de Assis; FERREIRA, Maria da Graça de Vasconcelos Xavier; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 437-449, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160002.0041>.

PARMA, G. O. C. **Metadados nas camadas na cartografia cadastral. Uma alternativa para a organização de dados e informações geográfica**. 2003. 160f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.- Florianópolis, Brasil, 2003.

PINTO, C. SOUZA. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**, Ed. Oficina de Textos. 2006.  
D’ALGE, Júlio César Lima. Cartografia para geoprocessamento. **Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos: INPE**, p. 32, 2001.

Renan Loureiro Xavier Nascimento (org.). **CADERNO DE CARACTERIZAÇÃO ESTADO DO CEARÁ**. Brasília: Codevasf, 2022. 146 p.

RODRIGUES, Felipe Silva *et al.* Avaliação do Comportamento Colapsível de um Solo não Saturado, do município de Juazeiro do Norte – CE. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA, 20., 2020, Juazeiro do Norte. **Anais [...]**. São Paulo: Sbm, 2020. p. 1-6.

ROQUE.A. J - Ambiente e sustentabilidade: desafios e perspectivas para a Geotecnia – Revista Geotecnia nº 143, 2018 – pp. 55-83 - Sociedade Portuguesa de Geotecnia (2018).

SANTOS, Valéria Elayne Carvalho dos; PEREIRA, Guilherme Fernando Cavalcanti; MEDEIROS, Iálysson da Silva; SANTOS, Martha Maria Bezerra. Elaboração dos mapas de suscetibilidade dos solos de Pombos (PE) aplicando o geoprocessamento com software QGIS. **Engineering Sciences**. [S.L.], v. 9, n. 3, p. 49-58, nov. 2021. Companhia Brasileira de Producao Científica. <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2318-3055.2021.003.0006>.

SIAGAS. **Sistema de Informações de Água Subterrânea**. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/index.php>. Acesso em: 03 jul. 2024.

SILVA, Mário José Ribeiro da. **Comportamento Geomecânico de Solos Colapsíveis e Expansivos em Petrolina PE: Cartas de Suscetibilidade**. 2003. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SILVA, Aline Cátia da. Avaliação do Potencial Colapsível e Expansivo de Solos do Nordeste Brasileiro por meio de Métodos Qualitativos e Quantitativos. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2022, Recife. **Congresso**. [S.L.]: Geojovem, 2022. p. 1-8.

SILVA, O. S. (2012). **Estudo de propriedades Geotécnico de um Solo Argiloso, Potencialmente Expansivo, compactado com e sem adição de cal**. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. 150p.

Silveira, P. E. M.; Reis, F. A. G. V. 2021. Elaboração de cartas geotécnicas aplicadas a solos colapsíveis em áreas urbanas utilizando o método do detalhamento progressivo. *Geologia USP. Série Científica*, 21, 2, 91- 106. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-174359>

SIMMES, P.R.M., COSTA FILHO, L.M., "Características mineralógicas de solos expansivos do Recôncavo Baiano", In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais, pp.569-588, Rio de Janeiro, 1981

SOBRAL, H.S., Contribuição ao estudo de Massapê como solo para construção, Tese para Cátedra de Matérias de Construção, Universidade Federal da Bahia, Escola de Belas Artes, Salvador, BA, 1956.

SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G. Procedimentos para Elaboração de Cartas Geotécnicas no Planejamento Urbano. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 67, p. 141 – 156, jan./fev. 2015.

SOUZA NETO, J. B., (2004). **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso)**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 432 p.

SOUZA, Leonardo Andrade de. **Cartografia geoambiental e cartografia geotécnica progressiva em diferentes escalas: aplicação na bacia hidrográfica do Ribeirão do Carmo, municípios de Ouro Preto e Mariana, Minas Gerais**. 2015. 461 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós -Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - Mg, 2015.

TAVARES, Camila de Melo; OLIVEIRA, Antônio Italcy de; CALADO, Ana Cláudia Almeida; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. UTILIZAÇÃO DE SIG APLICADA AOS ESTUDOS DE SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS DO ESTADO DO CEARÁ. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, [S.L.], p. 1-8, ago. 2022. ABMS.

Teixeira, C. Z. (1998). Solos Colapsíveis: Um Problema Para a Engenharia de Fundações. In: **27º Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Poços de Caldas, Brasil.

Vallejo, Luis I. Gonzáles, Mercedes Ferrer, Luis Ortuno, and Carlos Oteo. 2002. *Ingenieria Geologica*. 2004thed. Madrid: Prentice Hall Pearson Educación.

Vilar. O.M.; Ferreira, S.R de M. 2015. Solos colapsíveis e expansivos. In: José Camapum de Carvalho *et al.* (Orgs). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS - Associação Brasileira de Mecânica de Solos, 2015, p. 415-440.

VARGAS, M., "The concept of tropical Soils" In: Proceedings of the International Conference Geomechanics Tropical Lateritic And Saprolitic Soils,1, v.1, pp. 101-134, Brasília, 1985.

VASCONCELOS, R.P.R. de (2001). **“Mapas de Suscetibilidade de Solos Colapsíveis e Expansivos do Estado de Pernambuco”**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 93p.

VERÍSSIMO, K. J. S., (2016). **Avaliação da colapsibilidade e resistência de Ponta em um solo arenoso compactado de Petrolina-PE com e sem inundação**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 144f.

XAVIER, Jaily Moreira. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo colapsível voltado para fundações superficiais**. 2018. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós -Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

WOLSKI, M. S. *et al.* Contribuição à cartografia geotécnica de grandes áreas com o uso de sistemas de informações geográficas: uma aplicação à Região do Médio Uruguai (RS). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 3, Florianópolis. Anais... Florianópolis: COBRAC, 1998. 8p.

Ziani, H.; Abbèche, K.; Messaoudene, O.; Andrade Pais, L. J. 2019. Treatment of Collapsible Soils by Additions of Granulated Slag and Natural Pozzolan. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 1028-1042. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0051-0>.

Zimbaro, M.; Ercoli, L.; Mistretta, M. C.; Scaffaro, R.; Megna, B. 2020. Collapsible intact soil stabilisation using non-aqueous polymeric vehicle. *Engineering Geology*, 264, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105334>.

ZUQUETTE, Lázaro Valentim. **Análise Crítica da Cartografia Geotécnica e Proposta Metodológica para condições Brasileiras**. 1987. 250 f. Tese (Doutorado) - Curso de Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

ZUQUETTE, L.V.; NAKAZAWA, V.A. Cartas de geologia de engenharia. São Paulo: **ABGE**, 1998. p. 283-300.

## APÊNDICE

TABELA CRITÉRIO LEVANTAMENTO GEOLÓGICO

#	Cód.	Nome	Litotipo 1 (Superior)	Litotipo 2	Mineralogia	Exp.	Média Exp.	Col.	Média Col.
1	69	Cedro	Ortognaisse granítico	Pegmatito		1	1	3	3
2	122	Iara		Siltito argiloso, Conglomerado, Arenito fino, Arcóseo, Brecha cataclástica	Siltito argiloso	2	2	2	2
					Arenito fino	2		2	
					Arcóseo	2		2	
					Brecha cataclástica	2		2	
3	131	Riacho Angico Torto	Arenito arcoseano, Conglomerado, Brecha cataclástica	Rocha vulcânica, Dacito, Granito, Metarcóseo, Filito, Siltito, Argilito, Arenito	Arenito arcoseano	2	2	2	2
				Brecha cataclástica	2	2			
4	132	Cococi	Ardósia, Folhelho, Argilito	Arenito, Arenito arcoseano, Siltito, Siltito argiloso, Conglomerado polimítico	Ardósia	3	3	1	1
					Folhelho	3		1	
					Argilito	3		1	
5	167	Melancia	Conglomerado, Arenito	Siltito, Folhelho, Arenito arcoseano, Brecha sedimentar, Argilito	Arenito	2	2	2	2
					Siltito	3		2	
					Folhelho	2		1	
					Brecha sedimentar	2		2	
6	168	Massapê	Conglomerado suportado por matriz	Conglomerado polimítico		2	2	2	2
7	171	Pacujá	Arenito lítico,	Grauvaca, Folhelho	Arenito lítico	2	2	2	2

			<b>Arenito arcoseano</b>		Arenito arcoseano	2		2	
8	216	<b>Messejana</b>	<b>Fonolito, Traquito</b>	Tefrito, Tufo alcalino	Fonolito	1	1	2	2
					Traquito	1		2	
9	219	<b>Barreiras</b>	<b>Argilito arenoso, Arenito conglomerático</b>	Siltito, Conglomerado, Argilito, Arenito	Argilito arenoso	3	2	1	2
					arenito conglomerático	2		2	
10	223	<b>Faceira</b>	<b>Conglomerado, Arenito</b>	Siltito	Conglomerado, Arenito	2	2	2	2
11	242	<b>Brejo Santo</b>	<b>Folhelho, Marga</b>	Arenito, Siltito	Folhelho	3	3	1	1
					Marga	3		1	
12	278	<b>Antenor Navarro</b>		Arenito arcoseano, Arenito, Conglomerado polimítico, Conglomerado	Arenito	2	2	2	2
13	319	<b>Algodões</b>	<b>Biotita gnaissé fino, Actinolita anfíbolito, Paragnaisse, Metagranito</b>	Metatexito, Ortognaisse granodiorítico, Metarriolito, Metabasito, Quartzito feldspático, Granulito máfico, Gondito, Formação ferrífera bandada, Xisto pelítico	Biotita gnaissé fino	1	1	3	3
					Actinolita anfíbolito	1		3	
					Paragnaisse	1		3	
					Metagranito	1		3	
14	336	<b>Granjeiro</b>	<b>Granodiorito, Tonalito, Ortognaisse, Gnaissé, Xisto</b>	Metachert, Metapiroxenito, Metacalcário, Formação ferrífera bandada, Metabasito, Paragnaisse, Rocha metaultramáfica, Metatufo, Quartzito	Granodiorito	1	2	3	3
					Tonalito	1		3	
					Ortognaisse	1		3	
					Gnaissé	1		3	
					Xisto	3		1	
15	345	<b>Icó</b>	<b>Arenito, Argilito, Marga</b>	Siltito, Arenito arcoseano,	Arenito	2	3	2	2
					Argilito	3		1	

				Folhelho, Arenito lítico, Arenito conglomerático	Marga	3		1	
16	347	<b>Lima Campos</b>	<b>Arenito, Siltito</b>	Folhelho, Ritmito, Marga	Arenito	2	2	2	2
					Siltito	2		2	
17	349	<b>Malhada Vermelha</b>	<b>Argilito, Siltito, Arenito</b>	Calcário, Ritmito, Folhelho, Marga	Argilito	3	3	1	2
					Siltito	2		2	
					Arenito	2		2	
18	354	<b>Santana</b>	<b>Calcilutito</b>	Calcário, Marga, Siltito calcífero	Calciculito	2	2	2	2
19	389	<b>Exu</b>	<b>Arenito</b>	Siltito, Pelito, Conglomerado, Arenito conglomerático	Arenito	2	2	2	2
20	394	<b>Jandaíra</b>	<b>Folhelho, Calcarenito, Calcilutito</b>	Evaporito, Siltito	Folhelho	3	3	1	2
					Calcarenito	2		2	
					Calciculito	2		2	
21	409	<b>Açu</b>	<b>Arenito, Siltito</b>	Folhelho	Arenito	2	2	2	2
					Siltito	2		2	
22	490	<b>Meruoca</b>		Ortoclásio granito, Fóide sienito, Microgranito, Monzonito, Monzodiorito, Pegmatito, Granófiro, Granodiorito, Granito pórfiro, Sienito, Aplito		1	1	1	1
23					Cascalho	1	1	2	2
24	645	<b>Moura</b>	<b>Cascalho, Areia</b>	Argila, Conglomerado polimítico	Areia	1		3	
25	705	<b>São Joaquim</b>	<b>Metarriolito,</b>	Quartzito, Mica	Metarriolito	1	2	3	2

			<b>Metacalcário</b>	xisto, Rocha calcissilicática, Mármore, Formação ferrífera bandada, Milonito	Metacalcário	3		1	
26	706	<b>Santa Terezinha</b>	<b>Filito, Xisto</b>	Metarriolito, Metacarbonato, Metavulcânica ácida, Chert, Marga	Filito	2	2	1	1
					Xisto	2		1	
27	724	<b>Coreaú</b>	<b>Arenito arcoseano, Grauvaca, Arcóseo</b>	Metarenito arcoseano, Metagrauvaca, Metaconglomerado	Arenito arcoseano	2	2	2	2
					Grauvaca	2		2	
					Arcóseo	2		2	
28	725	<b>Caiçaras</b>	<b>Ardósia, Quartzo metarenito</b>	Metassilito, Metarenito	Ardósia	1	1	3	3
					Quartzo metarenito	1		3	
29	726	<b>Frecheirinha</b>		Metassilito, Metamarga, Metacalcário, Quartzito, Marga		2	2	2	2
30	727	<b>Trapiá</b>	<b>Metaconglomerado</b>	Metarenito arcoseano		2	2	2	2
31	728	<b>Termometamorfito Mucambo</b>	<b>Hornfels</b>		Hornfels	2	2	2	2
32	772	<b>Plúton Chaval</b>	<b>Granodiorito, Quartzo monzonito, Quartzo sienito</b>	Monzogranito, Sienito, Sienogranito	Granodiorito	1	1	3	3
					Quartzo monzonito	1		3	
					Quartzo sienito	1		3	
33	1	<b>Conceição</b>		Quartzo diorito, Granodiorito, Granito, Tonalito		1	1	3	3
34	781	<b>Itaporanga</b>	<b>Biotita granito porfirítico</b>	Monzonito, Granodiorito, Granito, Gabro, Diorito	Biotita granito porfirítico	1	1	3	3
35	1186	<b>Acopiara</b>	<b>Metatexito, Gnaiss aluminoso, Diatexito, Biotita xisto</b>	Biotita leucogranito, Pegmatito, Metacalcário magnesiano, Metarcóseo,	Metatexito	1	2	3	3
					Gnaiss aluminoso	2		2	
					Diatexito	1		3	

				Metagranito, Migmatito, Quartzito, Rocha calcissilicática, Mármore, Xisto, Anfibolito	Biotita xisto	3		3	
36	1198	<b>Independência</b>	<b>Xisto, Metacalcário</b>	Gnaissse, Paragnaisse, Ortognaisse, Metagabro, Quartzito, Mica xisto, Rocha calcissilicática, Mármore, Anfibolito	Xisto	3	3	1	1
					Metacalcário	2		1	
37	1207	<b>Arneiroz</b>	<b>Xisto, Metacalcário, Gnaissse</b>	Quartzito, Rocha calcissilicática, Mármore, Anfibolito	Xisto	3	2	1	1
					Metacalcário	2		1	
					Gnaissse	1		1	
38	1214	<b>Granja</b>	<b>Metatonalito, Metagranodiorito, Metagranito, Migmatito</b>	Metatrondhjemitó, Ortognaisse	Metatonalito	1	1	3	3
					Metagranodiorito	1		3	
					Metagranito	1		3	
					Migmatito	1		3	
39	1227	<b>Jaguaretama</b>	<b>Paragnaisse, Ortognaisse</b>	Xisto, Calcário cristalino, Metatexito, Diatexito	Paragnaisse	1	1	3	3
					Ortognaisse	1		3	
40	1364	<b>Granja, granulítica</b>	<b>Enderbito, Gnaissse granulítico, Kinzigito</b>		Enderbito	1	1	2	2
					Gnaissse granulítico	1		3	
					kinzigito	1		2	
41	1452	<b>Serra de São José</b>		Metaconglomerado, Quartzito, Rocha metavulcânica, Mármore, Xisto, Biotita gnaissse		1	1	3	3

42	1507	<b>Depósitos aluvionares</b>	<b>Areia, Areia arcoseana</b>	Silte, Cascalho, Argila, Conglomerado polimítico		1	1	2	2
43	1556	<b>Mauriti</b>	<b>Arenito, Conglomerado</b>	Siltito, Folhelho	Arenito	2	2	2	2
					Conglomerado	1		1	
44	1926	<b>Depósitos eólicos litorâneos</b>	<b>Areia</b>			1	1	1	1
45	2036	<b>Missão Velha</b>	<b>Arenito, Siltito</b>	Folhelho	Arenito	2	2	2	2
					Siltito	2		2	
46	2093	<b>Covão</b>	<b>Xisto</b>	Muscovita xisto, Filito	Xisto	2	2	1	1
47	2111	<b>Santana dos Garrotes</b>		Formação ferrífera bandada, Metarritmito, Metarenito lítico, Metapiroclástica, Metagrauvaca, Metaconglomerado, Rocha metavulcânica félsica, Rocha metavulcânica máfica		2	2	2	2
48	2128	<b>Lavras da Mangabeira</b>	<b>Xisto</b>	Granada-biotita xisto, Metaconglomerado, Quartzito, Sericita xisto, Filito, Biotita xisto		2	2	1	1
49	2197	<b>Serra do Deserto</b>	<b>Granito, Granodiorito</b>	Quartzito monzonito, Quartzito sienito, Augen gnaisse, Metagranito	Granito	1	1	3	3
					Granodiorito	1		3	
50	2402	<b>Catingueira</b>		Monzogranito, Sienogranito, Quartzito sienito		1	1	3	3

51	2484	<b>Plúton Pereiro</b>		Monzonito, Granodiorito, Granito, Diorito		1	1	3	3
52	2500	<b>Plúton Campos Sales-Assaré</b>		Monzonito, Granodiorito, Granito, Diorito		1	1	3	3
53	2830	<b>Tucunduba</b>		Granodiorito, Granito		1	1	3	3
54	2838	<b>Pedra Lisa</b>		Granodiorito, Granito		1	1	3	3
55	2866	<b>Mucambo</b>		Granodiorito, Granito		1	1	3	3
56	2867	<b>Serra do Barriga</b>		Granodiorito, Granito, Biotita sienogranito, Biotita monzogranito		1	1	3	3
57	2870	<b>Canindé do Ceará, quartzito</b>		Quartzito		1	1	3	3
58	2891	<b>Lavras da Mangabeira, quartzito</b>		Quartzito		1	1	3	3
59	2893	<b>Plúton Nova Russas</b>		Quartzito monzonito, Granodiorito, Granito pórfiro, Granito		1	1	1	1
60	2896	<b>Independência, quartzito</b>		Quartzito		1	1	1	1
61	2899	<b>Granitóides indiscriminados brasileiros</b>		Monzogranito, Quartzito diorito, Quartzito monzonito, Granodiorito, Granitóide, Granito pórfiro, Sienogranito, Tonalito, Biotita granito, Metagranito		1	1	1	1

62	3284	<b>Caicó, ortognaisse</b>		Augen gnaiss, Ortognaisse granodiorítico, Metagranito, Migmatito		1	1	3	3
63	3287	<b>Caicó</b>		Augen gnaiss, Paragnaisse, Ortognaisse, Rocha metaultramáfica, Metamáfica, Migmatito, Anfibolito, Rocha calcissilicática, Mármore		1	1	3	3
64	3299	<b>Serrote do Limoeiro</b>		Siltito, Folhelho, Arenito, Argilito		2	2	2	2
65	3300	<b>Iborepi</b>		Arenito conglomerático, Arenito		2	2	2	2
66	3302	<b>Lavras da Mangabeira, filito</b>	<b>Filito</b>	Sericita xisto	Filito	3	3	1	1
67	3306	<b>Santarém</b>		Metachert, Metarcóseo, Quartzito, Rocha calcissilicática, Rocha metavulcânica, Mármore, Gnaiss, Filito, Xisto, Anfibolito, Metagrauvaca, Milonito		2	2	2	2
68	3308	<b>Santarém, quartzito</b>	<b>Quartzito</b>		Quartzito	1	1	1	1
69	3334	<b>São João do Sabugi</b>		Monzodiorito, Quartzo diorito, Quartzo monzodiorito, Gabronorito, Gabro, Diorito		1	1	3	3
70	3387	<b>Basalto Umarizinho</b>	<b>Basalto</b>		Basalto	1	1	1	1
71	3447	<b>Cruzeta</b>	<b>Metatonalito,</b>	Pegmatito, Albita-	Metatonalito	1	1	3	3

			<b>Metagranodiorito</b>	epidoto-calcita-plagioclásio-hornblenda metabasito, Metaleucogranito, Paragnaisse, Metaultramafito, Metatrondhjemito, Metagranito, Metagabróide, Metadiorito, Quartzito, Arcoseano, Mármore dolomítico, Gondito, Formação ferrífera ba	Metagranodiorito	1		3	
72	3490	<b>Depósitos colúvio-eluviais</b>		Cascalho, Argila, Areia	Cascalho	1	2	1	2
				Argila	3	1			
				Areia	2	2			
73	3498	<b>Aprazível</b>		Conglomerado suportado por matriz, Arenito arcoseano, Siltito, Arenito, Brecha cataclástica		2	2	2	2
74	3585	<b>Depósitos de tálus recente</b>		Cascalho, Argila, Areia	Cascalho	1	2	1	2
				Argila	3	1			
				Areia	2	2			
75	3902	<b>Madalena</b>	<b>Metatonalito</b>	Granodiorito, Tonalito, Diorito	Metatonalito	1	1	3	3
76	3903	<b>Algodões, metavulcânica ácida</b>		Metarriolito		1	1	3	3
77	3914	<b>Banabuiú</b>	<b>Albita granito</b>	Biotita-granada leucogranito, Monzogranito, Sienogranito, Leucogranito	Albita granito	1	1	3	3

78	3916	<b>Plúton Rio Quixeramobim</b>		Granitóide, Monzonito, Quartzo monzodiorito, Sienogranito		1	1	3	3
79	3922	<b>Cruzeta, formação ferrífera bandada</b>	<b>Formação ferrífera bandada</b>		Formação ferrífera bandada	1	1	3	3
80	3926	<b>Plúton Quixadá</b>	<b>Sienito, Monzonito</b>	Granodiorito, Diorito	Sienito	1	1	3	3
					Monzonito	1		3	
81	3927	<b>Juatama</b>	<b>Metatexito, Diatexito</b>	Paragnaisse, Migmatito, Rocha calcissilicática, Anfíbolito	Metatexito	1	1	2	2
					Diatexito	1		2	
82	4221	<b>Taparuaba</b>		Monzogabro, Quartzo monzodiorito, Granodiorito, Granito, Diorito		1	1	3	3
83	4223	<b>Serrote Gado Bravo</b>		Biotita granodiorito, Monzogranito, Sienito		1	1	3	3
84	4224	<b>Granitóide Santa Quitéria</b>		Monzonito, Monzogranito, Quartzo monzonito, Quartzo sienito, Granodiorito, Granito, Sienito, Sienogranito, Metagranito		1	1	3	3
85	4225	<b>Diorito Boi</b>		Quartzo diorito, Diorito		1	1	3	3
86	4269	<b>Algodões, anfíbolito</b>				1	1	1	1

87	4274	<b>Canindé do Ceará, paragnaisse migmatítico</b>		Pegmatito, Paragnaisse, Metabasito, Migmatito, Quartzito, Rocha calcissilicática, Mármore, Gondito, Gnaisse, Formação manganésifera, Anfibolito		1	1	1	1
88	4277	<b>Canindé do Ceará, ortognaisse migmatítico</b>	<b>Paragnaisse, Ortognaisse granodiorítico, Metagranodiorito</b>	Pegmatito, Metagranito, Metatexito, Granulito, Diatexito, Biotita gnaisse, Anfibólio xisto		1	1	1	1
89	4810	<b>Piquet Carneiro</b>	<b>Quartzo monzonito, Granito</b>	Granodiorito, Sienito		1	1	3	3
90	4815	<b>Ipu</b>	<b>Arenito conglomerático</b>	Siltito, Conglomerado polimítico, Argilito, Arenito		2	2	2	2
91	4822	<b>Tauá, granito</b>	<b>Granito</b>	Quartzo monzonito, Granodiorito		1	1	3	3
92	4823	<b>Tauá, diorito</b>		Granodiorito, Granito, Tonalito, Diorito		1	1	3	3
93	4831	<b>Jaicós</b>	<b>Arenito</b>	Siltito, Argilito, Arenito conglomerático, Conglomerado		2	2	2	2
94	4838	<b>Morro dos Torrões</b>	<b>Gnaisse</b>	Paragnaisse, Metavulcânica félsica, Rocha calcissilicática, Brecha hidrotermal		2	2	2	2

95	4840	<b>Bonsucesso</b>	<b>Quartzito micáceo</b>	Metagabro, Metabasalto, Conglomerado		1	1	1	1
96	4843	<b>Caraúbas</b>	<b>Muscovita-biotita xisto</b>	Metachert, Metassilito, Metarenito, Metaconglomerado, Metacalcário, Muscovita quartzito, Filito, Metavulcânica máfica, Metavulcânica félsica, Metaultramafito, Metagabro, Brecha hidrotermal, Esteatito		2	2	2	2
97	4844	<b>Caraúbas, metacalcário dolomítico</b>	<b>Metacalcário dolomítico</b>			3	3	3	3
98	4847	<b>Caraúbas, metamáfica</b>	<b>Metabasito</b>			3	3	3	3
99	4849	<b>Caraúbas, metaultramáfica</b>	<b>Talco xisto, Xisto ultramáfico</b>			3	3	3	3
100	4851	<b>Caraúbas, metachert</b>	<b>Metachert</b>			2	2	2	2
101	4860	<b>Granito Alecrim</b>	<b>Biotita monzogranito</b>			1	1	3	3
102	4863	<b>Granito Serra do Picote</b>	<b>Biotita granito</b>	Biotita granodiorito	Biotita granito	1	1	3	3
103	4867	<b>Independência, metacalcário</b>	<b>Metacalcário</b>	Rocha calcissilicática, Mármore	Metacalcário	3	3	1	1
104	4870	<b>Tróia, supracrustal</b>	<b>Mica xisto, Paragnaisse,</b>	Metachert, Metacalcário,	Mica xisto	3	2	1	2
					Paragnaisse	1		2	

			<b>Quartzito</b>	Rocha calcissilicática, Gondito, Anfibolito, Metaultramafito, Metatufo, Metabasalto, Gnaiss	Quartzito	1		3	
105	5288	<b>Granitóide Tanques</b>				1	1	3	3
106	5293	<b>Ortognaisse Serra da Palha</b>		Ortognaisse	Ortognaisse	1	1	3	3
107	5295	<b>Itapiúna</b>		Leucogranito, Metaleucogranito		1	1	3	3
108	5303	<b>Pedra Aguda</b>		Quartzito diorito, Gabronorito, Gabro		1	1	3	3
109	5358	<b>Ortognaisse Cipó</b>	<b>Ortognaisse tonalítico</b>			1	1	3	3
110	5511	<b>Tianguá</b>		Siltito, Folhelho, Argilito, Arenito		3	3	3	3
111	5646	<b>Plúton Serra Azul</b>		Granito pórfiro		1	1	3	3
112	5652	<b>Algodões, máfica-ultramáfica</b>		Hornblendito, Metagabro, Talco xisto		3	3	1	1
113	5686	<b>Campo Alegre 3</b>		Hornblendito, Rocha metavulcânica, Metachert, Rocha metaultramáfica, Metatufo, Metarriolito, Metadacito, Metabasalto, Anfibolito		1	1	1	1

114	5742	<b>Árãbia</b>		Hornblendito, Ortognaisse, Migmatito, Tremolito, Metamafito, Metachert, Paragnaisse, Ortognaisse granodiorítico, Rocha metaultramáfica, Metabasalto, Quartzito, Rocha calcissilicática, Mármore, Talco xisto, Ortognaisse tonalítico		1	1	1	1
115	5754	<b>Leucogranito Penedos</b>		Sienogranito		1	1	3	3
116	5755	<b>Granito Amontada</b>		Biotita granito		1	1	3	3
117	5756	<b>Macaco</b>		Granulito		1	1	3	3
118	1	<b>Sienito Gurupá</b>		Gabro, Sienito		1	1	2	2
119	5775	<b>Sitiá</b>		Conglomerado, Arenito		2	2	2	2
120	5780	<b>Granito Oiti</b>		Álcali-granito, Monzogranito, Quartzo sienito, Sienogranito		1	1	3	3
121	5794	<b>Morada Nova</b>		Granodiorito, Granito		1	1	3	3
122	5795	<b>Jaguaretama, ortognaisse</b>		Paragnaisse, Ortognaisse, Rocha calcissilicática, Anfibolito		1	1	1	1

123	5796	<b>Jaguaretama, paragnaisse migmatítico</b>		Leucogranito, Paragnaisse, Metarcóseo, Metagranito, Migmatito, Rocha calcissilicática, Mármore, Diatexito, Xisto, Anfíbolito		1	1	3	3
124	5807	<b>Tróia, plutônica</b>		Hornblendito, Cromitito, Metaultramafito, Metatonalito, Metagranodiorito, Metagabro, Metadiorito, Serpentinito		1	1	1	1
125	5809	<b>Tróia, rocha metaultramáfica</b>		Hornblendito, Cromitito, Serpentinito		1	1	1	1
126	5813	<b>Ortognaisse Bananeira</b>		Gnaisse granítico, Gnaisse, Biotita gnaisse		1	1	3	3
127	5960	<b>Boa Viagem</b>		Granitóide, Paragnaisse, Migmatito, Ortognaisse tonalítico		1	1	3	3
128	5961	<b>Algodões, metassedimentos</b>	<b>Paragnaisse, Muscovita-biotita xisto</b>	Quartzito, Rocha calcissilicática, Anfíbolito		1	1	3	3
129	5962	<b>São Gonçalo</b>	<b>Leucogranitóide, Migmatito, Hornblenda gnaisse</b>	Ortognaisse migmatítico, Anfíbolito, Rocha metaultramáfica, Quartzito, Xisto		1	1	3	3
130	5963	<b>Metatonalito Mirador</b>	<b>Metatrondhjemito</b>			1	1	3	3
131	6066	<b>Pajé</b>		Monzogranito, Granodiorito, Sienogranito		1	1	3	3

132	6068	<b>Parapuí, riolito</b>		Riolito		1	1	3	3
133	6069	<b>Parapuí, basalto</b>				1	1	1	1
134	6085	<b>Cariré</b>		Enderbito, Granulito máfico, Gnaiss		2	2	2	2
135	6114	<b>Fazenda Fortaleza</b>		Conglomerado polimítico		1	1	3	3
136	6115	<b>Barra do Sairi</b>		Conglomerado polimítico		1	1	3	3
137	6116	<b>Anil</b>		Monzodiorito, Granodiorito		1	1	3	3
138	6127	<b>Dom Severiano</b>		Tonalito, Diorito		1	1	3	3
139	6141	<b>Morada</b>		Arenito feldspático, Arenito micáceo, Arenito arcoseano, Siltito, Argilito, Arenito lítico, Arenito		2	2	2	2
140	6148	<b>Lagoa Caiçara</b>		Migmatito, Rocha calcissilicática, Ortognaisse granodiorítico		1	1	2	2
141	6271	<b>Sienito Brejinho</b>		Nefelina sienito, Piroxenito, Sienito		1	1	2	2
142	6272	<b>Goiabeira</b>		Paragnaisse, Sericita xisto, Xisto, Quartzito		1	1	3	3
143	6291	<b>Santa Terezinha, quartzito</b>		Quartzito		1	1	3	3

144	6292	<b>Saquinho</b>		Metarriolito, Metabasalto, Rocha calcissilicática, Formação ferrífera bandada, Rocha vulcanoclástica		1	1	3	3
145	6333	<b>Lagoa da Serra</b>		Monzogranito, Quartzo monzodiorito, Quartzo monzonito, Sienito		1	1	3	3
146	7198	<b>Abaiara</b>		Siltito, Folhelho siltico, Arenito		2	2	2	2
147	7199	<b>Nenelândia</b>		Granito		1	1	3	3
148	7200	<b>Tamboril</b>		Metatexito, Gnaisse calcissilicático, Granada anfibolito, Quartzito, Mica xisto, Mármore, Diatexito		2	2	3	3
149	7201	<b>Piancó</b>		Ortognaisse migmatítico, Mica xisto, Rocha calcissilicática, Mármore		2	2	2	2
150	7202	<b>Barbalha</b>		Folhelho, Conglomerado, Arenito		3	3	1	1
151	7204	<b>Itataia</b>		Quartzito, Rocha calcissilicática, Mármore dolomítico, Mármore calcítico, Xisto		1	1	3	3