

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

SUSCEPTIBILITY MAP FOR THE OCCURRENCE OF EXPANSIVE AND COLLAPSIBLE SOILS IN THE STATE OF CEARÁ

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LA OCURRENCIA DE SUELOS EXPANSIVOS Y COLAPSIBLES EN EL ESTADO DE CEARÁ

Letícia Moreira de Carvalho

Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru-PE, Brasil, leticia.moreira@ufpe.br, <https://orcid.org/0009-0001-6233-0254>

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Doutora em Engenharia Civil, Docente Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru-PE, Brasil, isabelamcvbello@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3072-7836>

RESUMO: O crescimento populacional causa uma consequente ocupação nos meios urbanos e rurais, no entanto, a falta de previsão do comportamento do solo contribui para o surgimento de diversos problemas nas edificações. Esta pesquisa tem como objetivo produzir o mapa de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis do estado do Ceará, tendo como os condicionantes de Climatologia, Pedologia e Geologia, de modo a compará-lo com os 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. Na carta interpretativa Pedologia/Geologia verificou-se média suscetibilidade à expansão (56,99%) e média ao colapso (61,76%). Na carta interpretativa Pedologia/Geologia/Clima obteve-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, verificou-se 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 desta pesquisa contribuem para o planejamento urbano e implantação de obras civis no Ceará

Palavras-chave: Georreferenciamento; Suscetibilidade; Expansão; Colapso.

ABSTRACT: Population growth causes a consequent occupation in urban and rural areas, however, the lack of prediction of soil behavior contributes to the emergence of several problems in buildings. This research aims to produce the map of susceptibility to occurrence of expansive and collapsible soils in the state of Ceará, having as the conditioning factors of Climatology, Pedology and Geology, to compare it with the points of occurrence made available by the bibliography. The Geographic Information System (GIS) QGIS 3.28 was used to prepare the derived susceptibility maps based on the fundamental maps. In the interpretative chart Pedology/Geology, medium susceptibility to expansion (56.99%) and medium to collapse (61.76%) were verified. In the resulting interpretative chart Pedology/Geology/Climate, low (36.34%), medium (61.67%) and high (1.98%) susceptibility to expansion and low (23.08%), medium (76.47%) and high (0.4%) susceptibility to collapse were obtained. Its comparing the results obtained in the resulting interpretative chart with the cases reported in the literature, it was found that the areas that present soils susceptible to collapse behavior are larger than the areas that present soils with expansive behavior, as well as the number of studies carried out on these soils. The results of this research contribute to the urban planning and implementation of civil building in Ceará.

Keywords: Georeferencing; Susceptibility; Expansion; Collapse.

RESUMEN: El crecimiento poblacional provoca una consecuente ocupación en zonas urbanas y rurales, sin embargo, la falta de predicción del comportamiento del suelo contribuye a la aparición de varios problemas en las edificaciones. Esta investigación tiene como objetivo elaborar el mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de suelos expansivos y colapsables en el estado de Ceará, teniendo como condicionantes la Climatología, la Pedología y la Geología, con el fin de compararlo con los puntos de ocurrencia puestos a disposición por la bibliografía. Se utilizó el Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS 3.28 para elaborar los mapas de susceptibilidad derivados basados en los mapas fundamentales. En la carta interpretativa Pedología/Geología se verificó la susceptibilidad media a la expansión (56,99%) y la media al colapso (61,76%). En la carta interpretativa resultante Pedología/Geología/Clima se verificó baja (36,34%), media (61,67%) y alta (1,98%) susceptibilidad a la expansión y baja (23,08%), media (76,47%) y alta (0,4%) susceptibilidad al colapso. Al comparar los resultados obtenidos en el gráfico interpretativo resultante con los casos reportados en la literatura, se encontró que las áreas que presentan suelos susceptibles al comportamiento de colapso son mayores que las áreas que presentan suelos con comportamiento expansivo, así como el número de estudios realizados sobre estos suelos. Los resultados de esta investigación contribuyen a la planificación urbana y a la ejecución de obras civiles en Ceará.

Palabras clave: Georreferenciación; Susceptibilidad; Expansión; Colapso.

1. INTRODUÇÃO

Solos não saturados são aqueles em que os poros não estão completamente preenchidos por líquidos e/ou gases. Esses solos apresentam uma variação de saturação que é ocasionada pela alteração do teor de umidade, consequentemente, 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 colapsáveis 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 *et al.*, 2002).

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 e solos colapsíveis nas regiões do Centro-sul, Nordeste e grande parte do Sudeste (MENDONÇA, 1990; FERREIRA *et al.*, 1991; ANDRADE, 2005; FUTAI; SUZUKI, 2010). No Ceará, alguns estudos indicam a ocorrência de solos colapsíveis e expansivos, a exemplo de Lôbo Neto (2013); Barbosa (2015), Chagas, Moura e Carneiro (2016) e Batista (2021).

Não se tem estimativas em relação ao custo dos danos causados pela ocorrência de solos expansivos e/ou colapsíveis no Brasil, não obstante, os danos foram identificados no 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 em Ferreira (1988) e Cavalcante *et al.* (2006), e solos colapsíveis, como constatado por Aragão; 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 suscetibilidade surgem como um instrumento importante na identificação e orientação sobre o uso do solo de um local, como comprovado em Vasconcelos (2001), Oliveira (2002), Silva e Ferreira (2003), Amorim (2004), Aquino e Ferreira (2022), Tavares *et al.* (2022), Santos *et al.* (2022), 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 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. Amorim (2004), a partir dos mapas fundamentais de clima, pedologia e geologia, elaborou 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/SC. Aquino e Ferreira (2022) elaboraram cartas interpretativas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos de Teresina/PI, também por levantamento do clima, da geologia e pedologia. Tavares *et al.* (2022) elaboraram cartas de suscetibilidade a colapso e expansão dos solos do Ceará, a partir das características das classes pedológicas. Santos *et al.* (2021) apresentaram mapas derivados da pedologia, para classificar os solos do referido local quanto a suscetibilidade 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, elaborada 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.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

O Estado do Ceará apresenta uma população de 8.794.957 habitantes distribuída em 184 municípios, sendo o 8º Estado mais populoso do país, com área total de 148.894,447 km², densidade demográfica 59,07 hab/km² e índice de desenvolvimento humano de 0,734 (IBGE, 2023). 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 1). Em termos de extensão territorial, o Ceará é o 4º maior da região Nordeste, ficando em 17º entre os estados brasileiros, e possui 184 municípios (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 e trinta e três microrregiões (Figura 2). (CODEVASF, 2022).

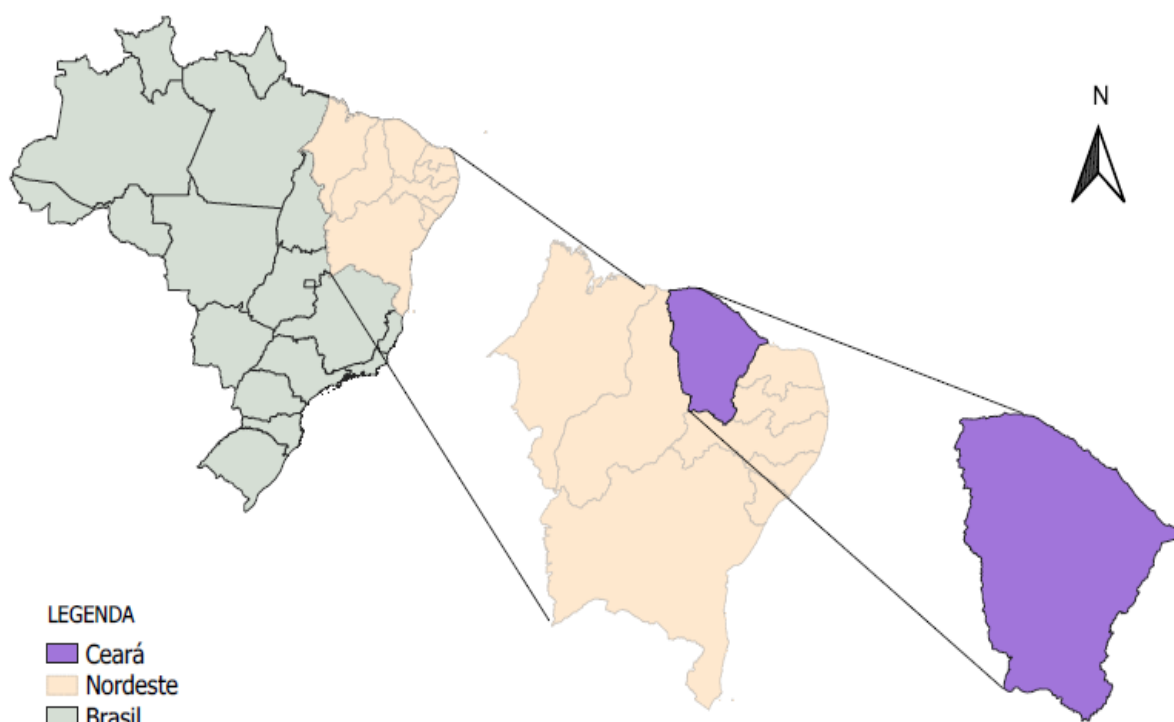


Figura 1 - Mapa de Localização Geográfica do Ceará. Fonte: Modificado do IBGE, 2021.

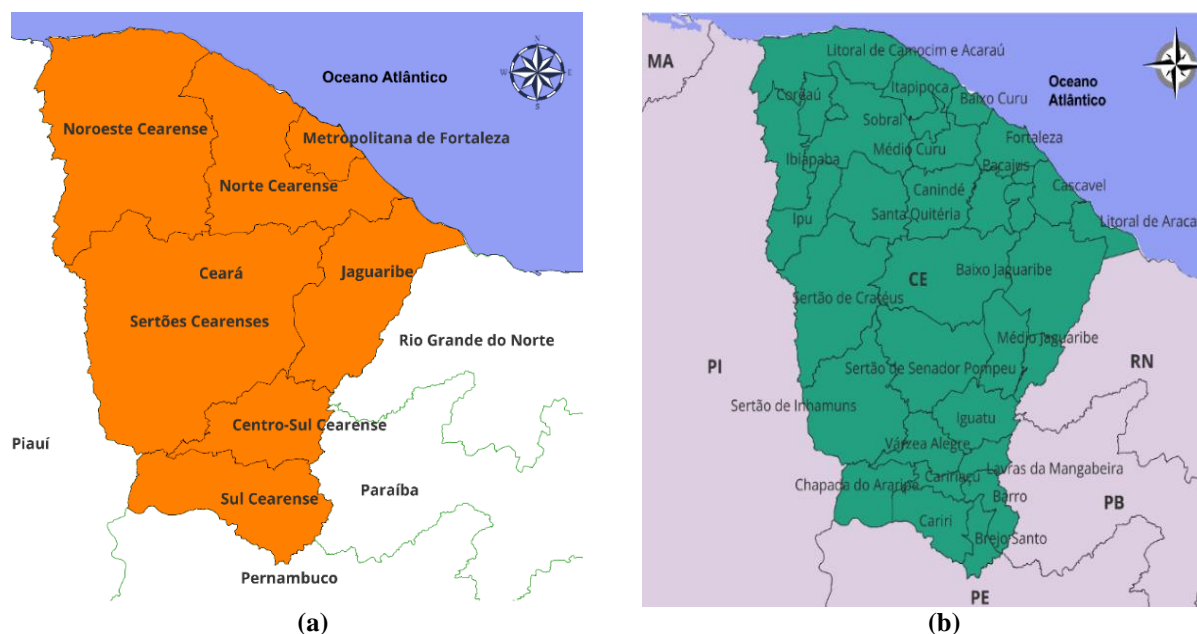


Figura 2 - Estado do Ceará: (a) Mesorregiões; e (b) Microrregiões. Fonte: Modificado do IBGE, 2021.

De acordo com Medeiros (2007), aproximadamente 93% do território do Estado do Ceará está inserido na região semiárida do Nordeste brasileiro. Essa predominância do semiárido imprime características marcantes à dinâmica climática e ambiental do estado, condicionando a ocorrência de longos períodos de estiagem. A precipitação média anual, geralmente inferior a 800 mm, apresenta forte irregularidade espacial e temporal. Além da escassez de precipitação, o clima semiárido cearense é marcado por altas temperaturas médias anuais (geralmente superiores a 26 °C) e por intensa radiação solar, o que resulta em taxas elevadas de evaporação e evapotranspiração.

O Estado do Ceará apresenta características pedológicas e litológicas fortemente condicionadas pela sua posição no semiárido nordestino e pela predominância de rochas cristalinas do embasamento Pré-Cambriano. Do ponto de vista litológico, cerca de 70% do território está assentado sobre o chamado embasamento cristalino, formado por gnaisses, migmatitos, quartzitos e granitos, pertencentes às províncias Borborema e São Francisco. Em menor proporção, observam-se áreas de bacias sedimentares fanerozóicas, especialmente na porção oeste (Bacia do Parnaíba) e no litoral, onde ocorrem depósitos arenosos e calcários recentes (JACOMINI, 2009).

Essas características litológicas influenciam diretamente a pedogênese regional. Os solos dominantes são, em geral, rasos, pedregosos e de baixa fertilidade natural, tais como os Neossolos Litólicos e os Luvisolos Crômicos, desenvolvidos sobre o embasamento cristalino. Em áreas de relevo mais suave ou sobre sedimentos mais recentes, destacam-se os Argissolos Vermelho-Amarelos e, em zonas de deposição aluvial, ocorrem Neossolos Flúvicos mais profundos e férteis. A forte sazonalidade climática, com longos períodos de estiagem, também limita o intemperismo químico mais intenso e favorece a ocorrência de solos pouco evoluídos.

2.2 Confeção de Mapas de Suscetibilidade

O mapa de suscetibilidade à ocorrência dos solos colapsáveis e expansivos do Ceará foi confeccionado em 4 fases, conforme apresentado na Figura 3.

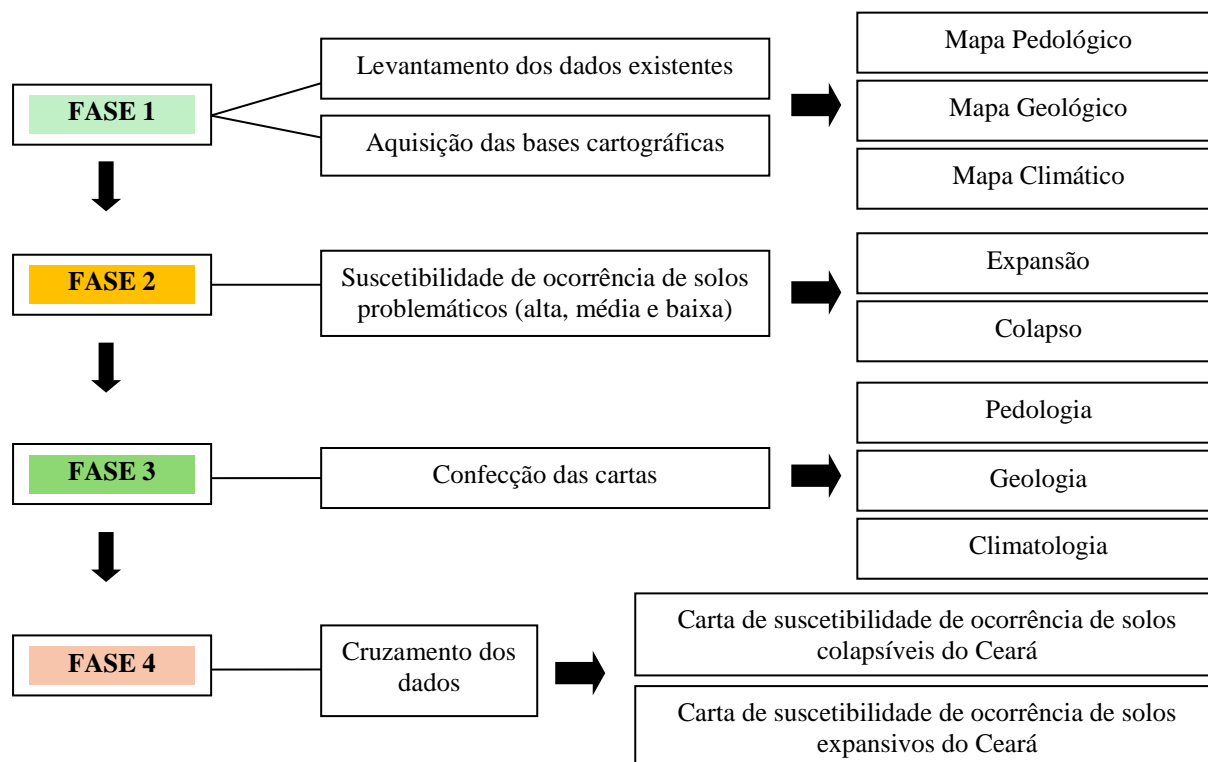


Figura 3 - Fases para confecção de mapas de suscetibilidade. Fonte: Os autores, 2025.

A Fase 1 consistiu na aquisição de bases cartográficas em formato shapefile (shp.). O mapa de Pedologia foi obtido no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O mapa de Geologia foi obtido no site da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), onde são disponíveis no banco de dados corporativo (GeoSGB), um conjunto de mapas e base de dados. O mapa de Clima classificado por Thornthwaite e Matter foi obtido na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Na Fase 2 é realizada a avaliação da suscetibilidade à ocorrência de solos problemáticos. Foi utilizada a metodologia reportada por Aquino (2020) e Amorim (2004), com adaptações necessárias para o local de estudo. De Aquino (2020) foi utilizada a mesma metodologia para a suscetibilidade da Geologia e o método ponderado, sendo modificada as denominações de suscetibilidade ‘Baixa’, ‘Média’ e ‘Alta’, para pesos, ‘1’, ‘2’ e ‘3’. De Amorim (2004) cada unidade do mapeamento foi classificada em três níveis de suscetibilidade: ‘Alta’, ‘Média’ e ‘Baixa’, com os respectivos valores utilizados como peso (Tabela 1). Além dos níveis de suscetibilidade, peso e descrição, visto que solos problemáticos contém um conjunto de características geológicas, pedológicas e climatológicas que evidenciam seu comportamento com base nas descrições de cada unidade do mapeamento, também foi utilizado os valores considerados para avaliação da suscetibilidade final. Para a Pedologia, os dados de expansão e colapso foram obtidos na matriz pedológica de suscetibilidade aos problemas geotécnicos (Tabela 2), proposta por Tavares *et. al* (2020).

Tabela 1: Graus e 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.

Tabela 2: Matriz pedológica de suscetibilidade aos problemas geotécnicos.

Classe Pedológica	Expansão	Erosão	Colapso	Dispersão
Argissolo Amarelo	Alta	Alta	Média	Alta
Argissolo Vermelho	Baixa	Alta	Média	Alta
Argissolo Vermelho-Amarelo	Baixa	Alta	Média	Alta
Cambissolo Hápico	Alta	Alta	Baixa	Média
Chernossolo Argilúvico	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Chernossolo Hápico	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
Luvisolo 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	Alta	Alta	Média	Baixa
Nitossolo Vermelho	Alta	Alta	Alta	Baixa
Planossolo Nátrico	Alta	Alta	Baixa	Alta
Planossolo Háprico	Alta	Alta	Baixa	Alta
Vertissolo Ebânico	Alta	Alta	Baixa	Alta
Vertissolo Hápico	Alta	Alta	Baixa	Alta

Fonte: Calado, Oliveira Júnior, Tavares, 2019.

Para a Geologia, a metodologia da classificação da suscetibilidade à expansão e ao colapso deu-se por classificação da mineralogia da litologia superior de cada unidade litológica de acordo com as Tabelas 3 a 5. Para as unidades litológicas da tabela de atributos do mapa de Geologia do Ceará (GeoSGB) que não ofereciam dados suficientes de minerais, 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 do Ceará. Foi consultado ainda o relatório da “Geodiversidade do estado do Ceará” elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil em 2014, onde são apresentadas suscetibilidades à erosão, expansão, colapso, entre outros, em cada domínio, para obras de engenharia, servindo como confirmação das classificações adotadas.

Tabela 3: Suscetibilidade à expansão e ao colapso da Geologia com base na Litologia.

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

Fonte: Aquino, 2020.

Tabela 4: Suscetibilidade à expansão do solo com relação à Geologia.

Suscetibilidade	Rochas cristalinas	Rochas sedimentares	Sedimentos
ALTO	Rochas máficas; micaxistos; rochas carbonáticas	Argilitos; folhelhos; calcários marinhos	argilas
MÉDIO	Rochas intermediárias	Arcósios; siltitos e arenitos calcíferos	Sedimentos areno-argilosos
BAIXO	Rochas ricas em quartzo; quartzitos	Arenitos quartzosos	Areias quartzosas, matéria orgânica e turfas

Fonte: Amorim, 2004.

Tabela 5: Suscetibilidade ao colapso solo com relação à Geologia.

Suscetibilidade	Rochas cristalinas	Rochas sedimentares	Sedimentos
ALTA	Rochas ricas em quartzo; quartzitos	Arenitos quartzosos	Areias quartzosas
MÉDIA	Rochas intermediárias	Arcósios; siltitos e arenitos calcíferos	Sedimentos areno-argilosos
BAIXA	Rochas máficas; micaxistos; rochas carbonáticas	Argilitos; folhelhos; calcários marinhos	Argilas; matéria orgânica e turfas

Fonte: Amorim, 2004.

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. Para esta pesquisa, foi obtido através da tabela de atributos do mapa os tipos climáticos, úmido (B1, B2, B3 e B4) e Seco subúmido (C1 e C2). Aquino (2020) fez a correlação entre a tipologia climática e os graus adotados com base no índice de umidade de Thornthwaite; Mather (1955), mostrado na Tabela 6. A classificação Alta, Média e Baixa Suscetibilidade se deu correlacionando a Tabela 6 com os tipos climáticos do Ceará classificados por Thornthwaite e Mather (Tabela 7).

A Fase 3 consistiu na confecção das cartas derivadas a partir das 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. Foram utilizados dados vetoriais com base cartográfica no formato shapefile (.shp), do Ceará.

Tabela 6: Correlação entre tipologia climática, índice de umidade de Thornthwaite; Mather (1955) e graus.

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	$0 \leq Iu < 20$	
Úmido	$20 \leq Iu < 100$	BAIXA
Super úmido	$100 \leq Iu$	

Fonte: Aquino (2020)

Tabela 7: Graus de Suscetibilidade para classificação Thornthwaite; Mather (1955) no Ceará.

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

Fonte: Autores, 2025.

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 uma para colapso.
- 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.
- iv) As cartas derivadas foram impressas pelo comando “Novo Compositor de Impressão”, sendo possível acrescentar grade de coordenadas, escala, norte, legenda e título

Na Fase 4, os dados geológicos, pedológicos e climatológicos são cruzados através de comandos do QGIS 3.28, como a Calculadora Raster que calcula a suscetibilidade das cartas derivadas pelo critério ponderado. Ao final, a classificação se dará como pesos Alto, Médio e baixo para os respectivos valores: $\geq 2,33$, $,67 > x < 2,33$ e $\leq 1,67$, segundo Amorim (2004).

2.3 Confeção das Cartas de Suscetibilidade

A carta derivada de suscetibilidade à solos expansivos e colapsáveis com base na Geologia foi confeccionada a partir do último mapa Geológico do estado do Ceará (Figura 4), 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, composta pela litologia superior, mineralogia dominante / secundária e acrescentadas as colunas de suscetibilidade à expansão e ao colapso na própria tabela de atributos. Também foram utilizadas informações da litologia por meio do relatório “Projeto Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Ceará”, do CPRM.

A metodologia utilizada para definir o grau de suscetibilidade à expansão e colapso de cada unidade litológica se deu pela comparação das suscetibilidades das litologias do Ceará com as da litologia do Pernambuco (ALHEIROS, 2003, disponibilizadas em AMORIM, 2004), e pela classificação 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, e no RIGEO - Repositório Institucional de Geociências. Todos os passos da metodologia das cartas derivadas de Geologia, foram fundamentadas com base na pesquisa de Amorim (2004) e Aquino (2020).

Na Figura 5 é apresentado o fluxograma contendo uma síntese dos procedimentos metodológicos utilizados para confecção das cartas de suscetibilidade derivadas da Geologia.

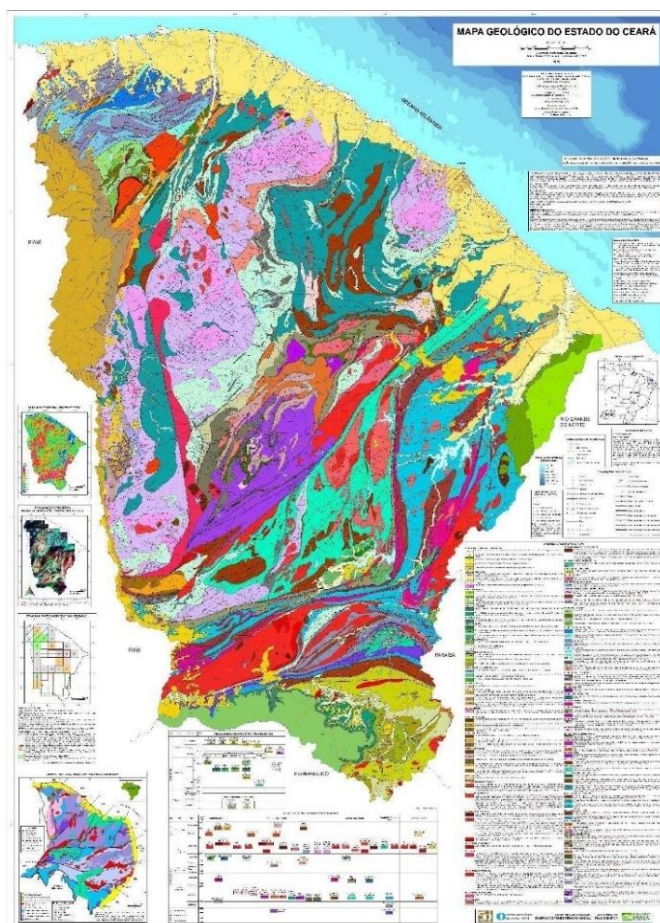


Figura 4: Mapa Geológico do estado do Ceará. Fonte: CPRM, 2021.

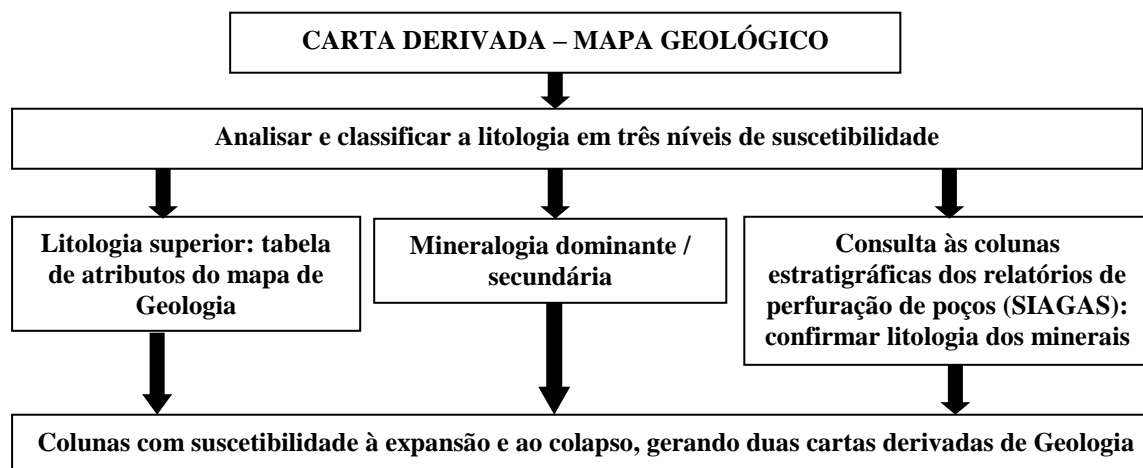


Figura 5: Metodologia empregada na elaboração das Cartas Derivadas da Geologia. Fonte: Autores, 2025.

2.3.1 Pedologia

As cartas derivadas de suscetibilidade de ocorrência de solos colapsáveis e expansivos do estado do Ceará, baseadas na Pedologia, 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 em Tavares et. al (2020), em que foi utilizado um relatório de um levantamento dos solos do estado do Ceará disponibilizado pelo IBGE. Inicialmente, foram identificadas as unidades pedológicas do estado e suas características geotécnicas para avaliar a suscetibilidade dos solos e suas aplicações na engenharia.

Foram criadas 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). 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 no SIG, permitindo análises georreferenciadas e criação de bancos de dados. O mapa pedológico foi baixado do site do IBGE e georreferenciado pelo Datum SIRGAS 2000, zona UTM 24S (Figura 6).

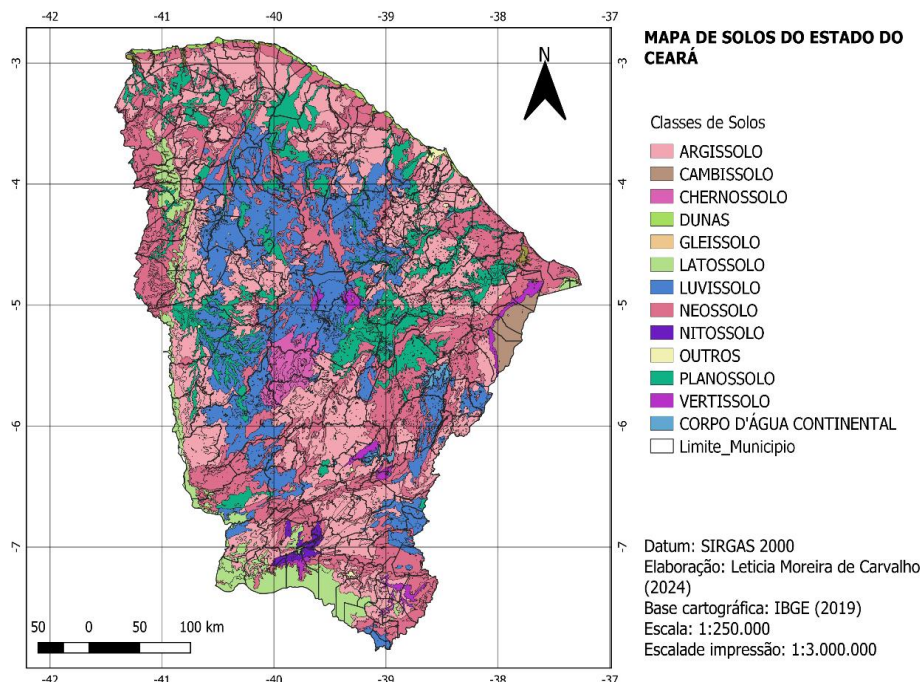


Figura 6: Mapa Pedológico do estado do Ceará. Fonte: Elaborado pela autora com base em IBGE, 2019.

Na Figura 7 é apresentado o fluxograma contendo uma síntese dos procedimentos metodológicos utilizados para confecção das cartas de suscetibilidade derivadas da pedologia.

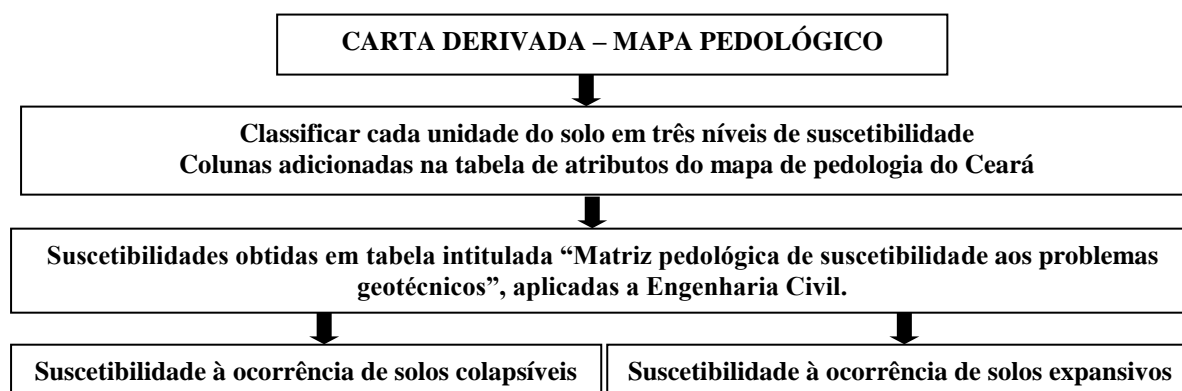


Figura 7: Metodologia empregada na elaboração das Cartas derivadas de Pedologia. Fonte: Autores, 2025.

3.2.2 Climatologia

Clima árido e semiárido possuem a característica de 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 (Figura 8).

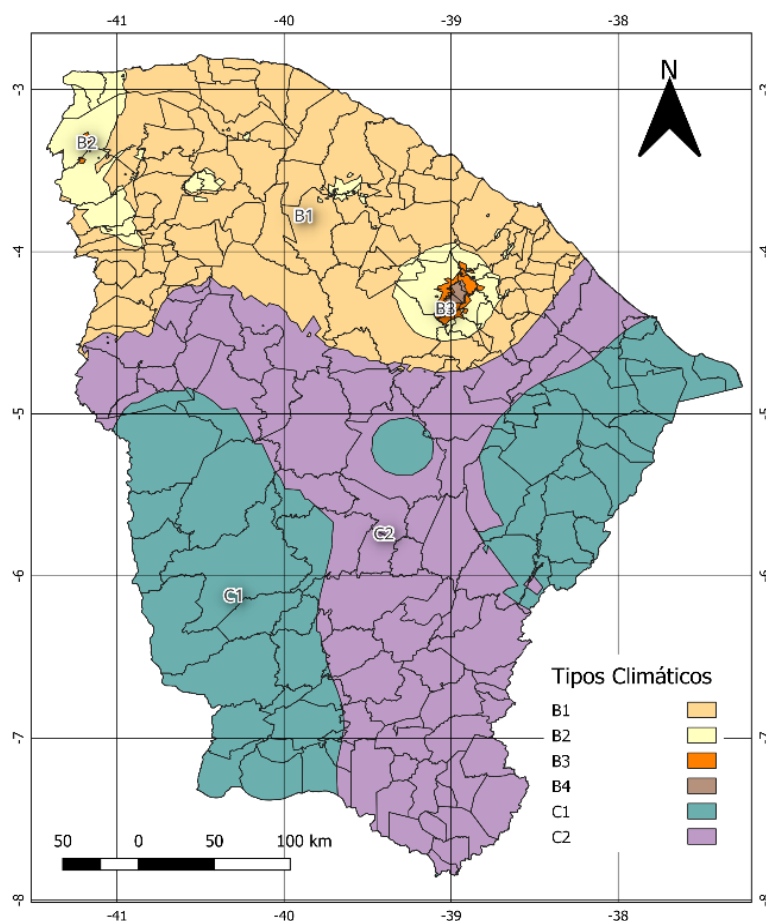
4. RESULTADOS

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

4.1.1 Base Geológica

Na Tabela 8 são apresentadas as variáveis 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: Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos com base na Geologia do Ceará (Figura 9) e Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis com base na Geologia do Ceará (Figura 10).



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

Figura 8: Mapa de clima do Ceará pela classificação de Thornthwaite e Mather. Fonte: Autores, 2025.

Tabela 8: 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,	Siltito argiloso	2	2	2	2
				Conglomerado,	Arenito fino	2		2	
				Arenito fino,	Arcóseo	2		2	
3	131	Riacho Angico Torto	Arenito arcoseano, Conglomerado, Brecha cataclástica	Arcóseo, Brecha cataclástica	Brecha cataclástica	2	2	2	2
				Rocha vulcânica, Dacito, Granito, Metarcóseo, Filito, Siltito, Argilito, Arenito	Arenito arcoseano	2		2	
				Arenito, Arenito arcoseano, Siltito, Conglomerado polimítico	Brecha cataclástica	2		2	
4	132	Cococi	Ardósia, Folhelho, Argilito	Ardósia	Folhelho	3	3	1	1
				Folhelho	Argilito	3		1	

Fonte: Autores, 2025.

Considerando apenas a Geologia, os solos da superfície Ceará apresentaram baixa (44,65%), média (45,45%) e alta (9,90%) suscetibilidade à expansão. Quanto ao colapso, os percentuais foram: baixa (23,70%), média (37,63%) e alta (38,67%) suscetibilidade (Figura 11).

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%).

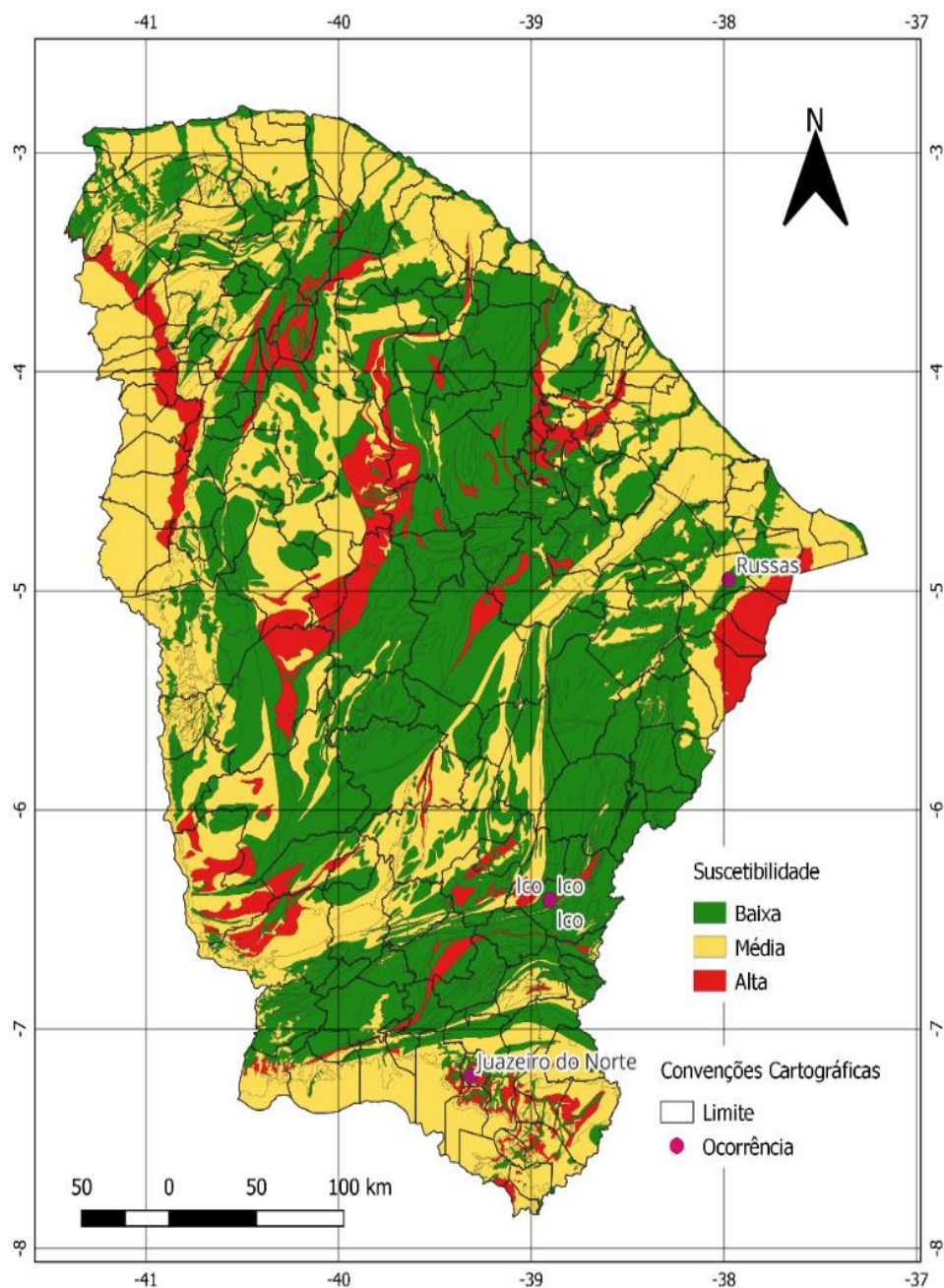


Figura 9: Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos com base Geológica do Ceará. Fonte: Autores, 2025.

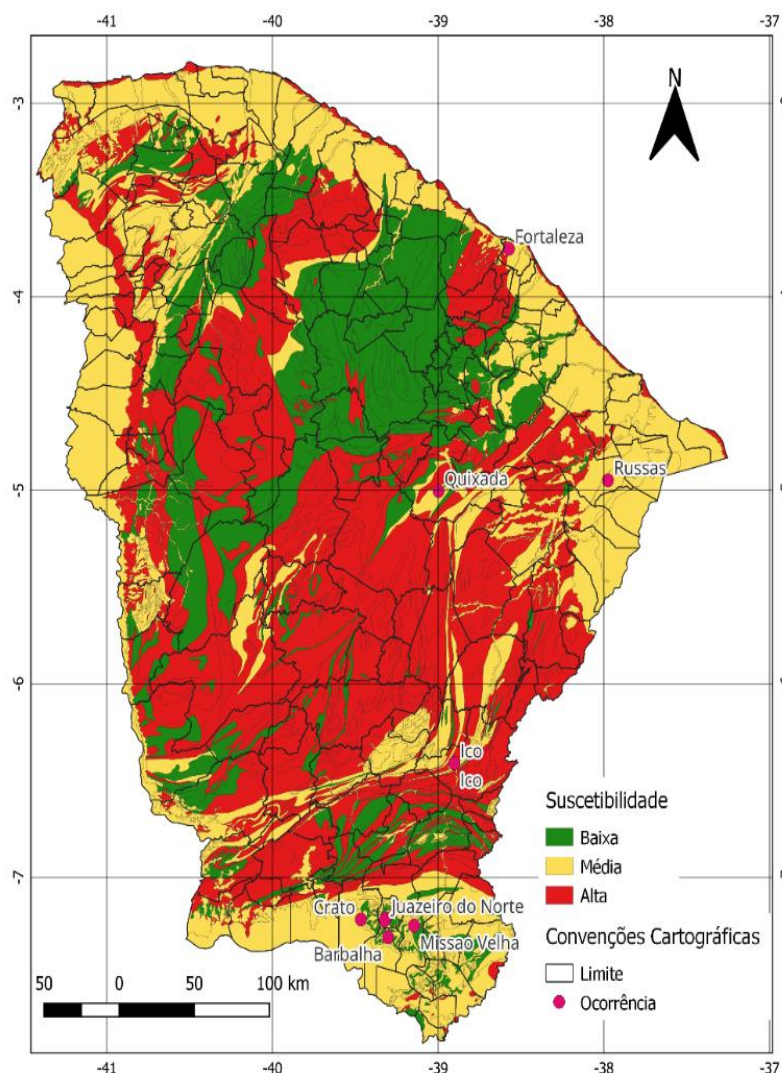


Figura 10: Suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis com base Geológica do Ceará. Fonte: Autores, 2024.

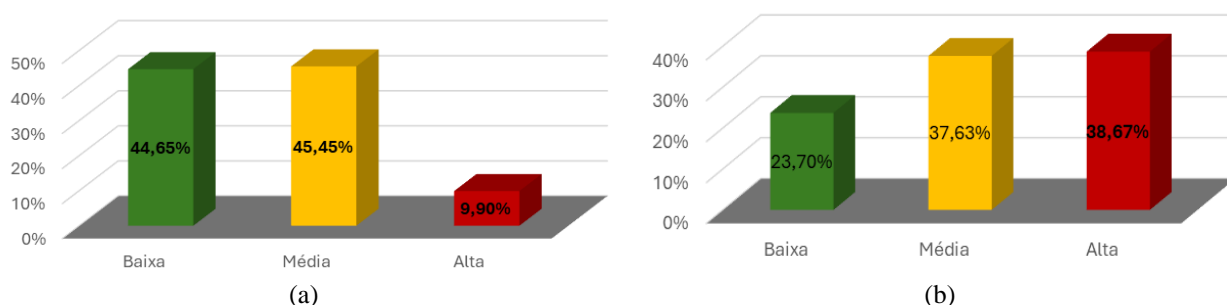


Figura 11: Percentuais de ocorrência de ocorrência com base Geológica do Ceará: (a) expansão; (b) colapso. Fonte: Autores, 2025.

4.1.2 Base Pedológica

Do mapa fundamental pedológico, foram obtidas duas cartas derivadas: Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis do Ceará, com base na Pedologia (Figuras 12a e 12b respectivamente). Em relação à expansão, verificou-se baixa suscetibilidade de ocorrência em uma área de 92.466,346 km² e alta suscetibilidade em uma área de 53.019,763 km². Para suscetibilidade média, não houve solo classificado. Em relação ao colapso, verificou-se baixa suscetibilidade de ocorrência em uma área de 79.385,973 km², média suscetibilidade em uma área de 56.070,624 km² e alta suscetibilidade em 10.029,512 km² de área.

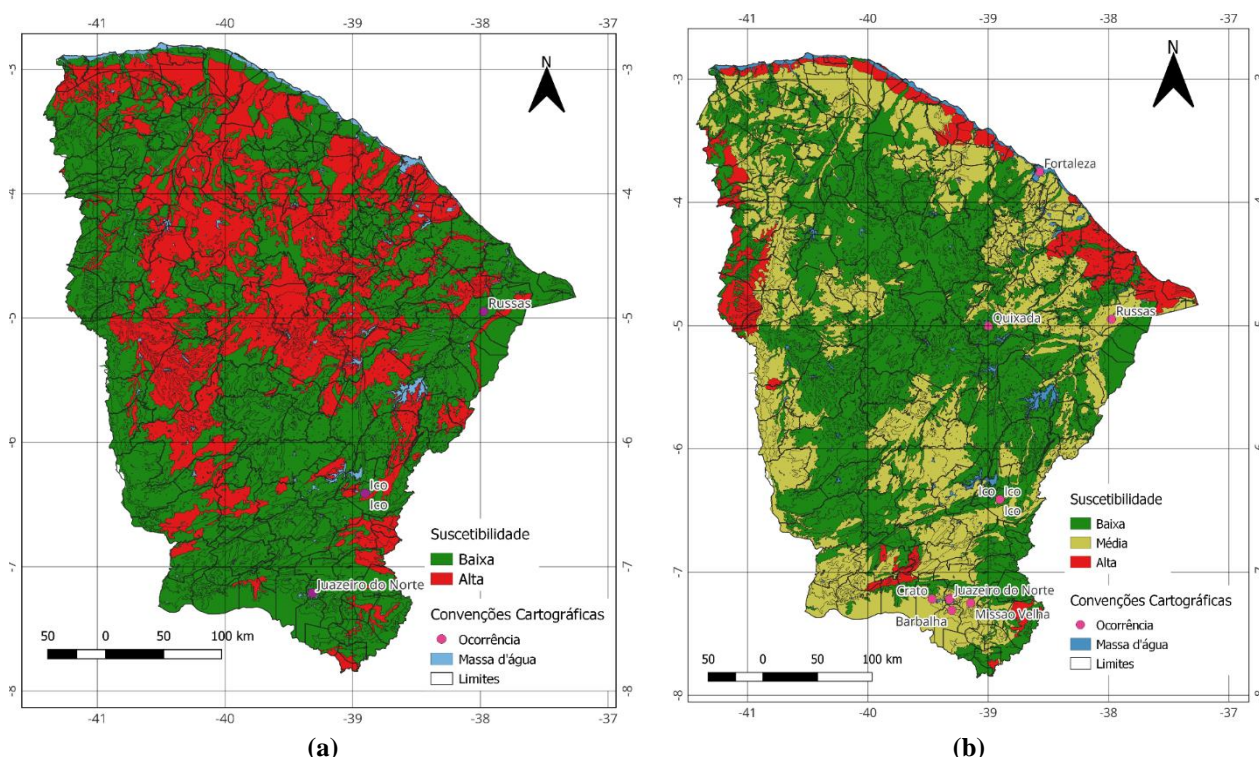


Figura 12: Suscetibilidade de ocorrência de solos com base Pedológica do Ceará: (a) solos expansivos; (b) solos colapsíveis. Fonte: Autores, 2025.

Considerando a Pedologia, os solos da superfície apresentam baixa (63,56%) e alta (36,44%) suscetibilidade à expansão. Não foi verificado solos com suscetibilidade média à expansão. Quanto ao colapso, os percentuais foram: baixa (54,57%), média (38,543%) e alta (6,89%) suscetibilidade (Figura 13). Neste caso, verifica-se diferença significativa nos valores percentuais de suscetibilidade à expansão baixa e alta (27,12%), com predominância na suscetibilidade alta. Também se verifica diferença nos valores de percentuais de suscetibilidade ao colapso baixa e média (16,03%), predominando a suscetibilidade alta.

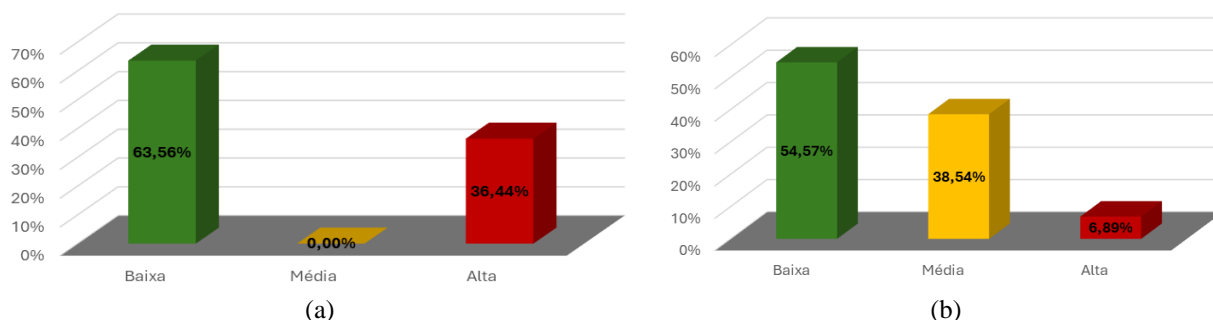
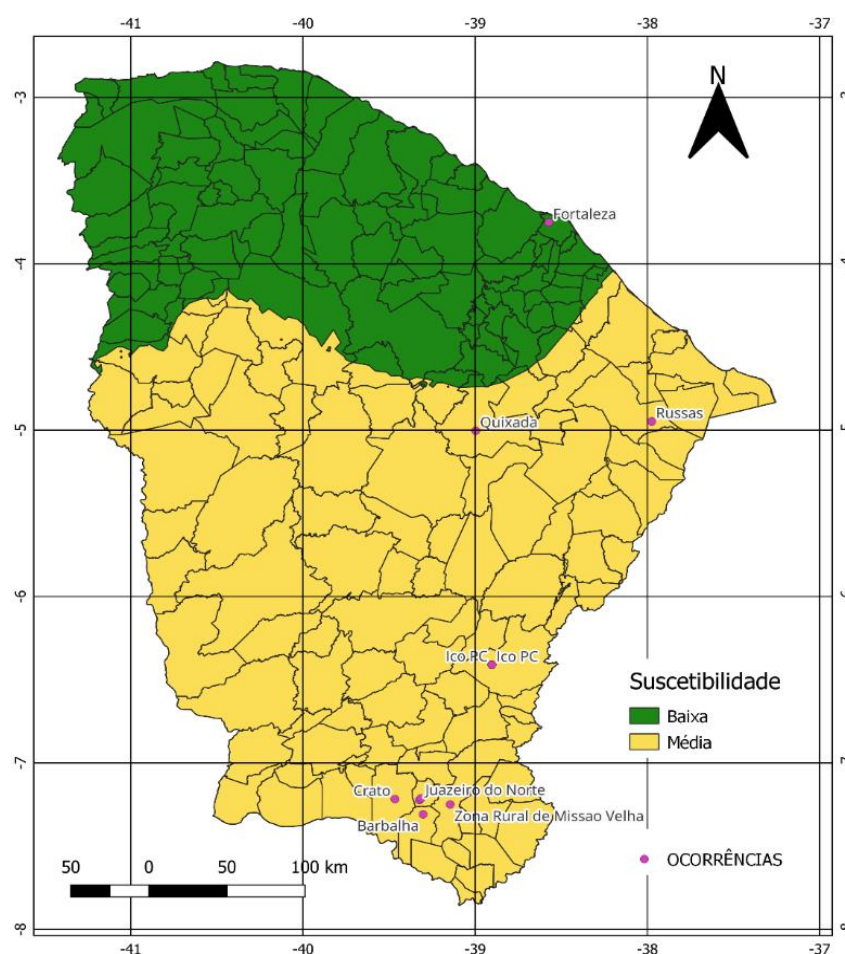


Figura 13: Percentuais de ocorrência à expansão com base Pedológica: (a) expansão; (b) colapso. Fonte: Autores, 2025.

4.1.3 Base Climatológica (Classificação de Thornthwaite)

Do mapa fundamental do Clima do Ceará pela classificação de Thornthwaite, foi obtida a carta derivada: Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis com base no Clima do Ceará (Figura 14). Foi observado que os solos com baixa suscetibilidade abrangem 33,33% da área total e para média suscetibilidade 66,67%, da área total (Figura 15). Para suscetibilidade alta, não houve solo classificado. Verifica-se, portanto, uma grande predominância da média suscetibilidade abrangendo dois terços da área total do solo 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.

Figura 14: Suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis com base Climatológica do Ceará. Fonte: Autores (2024).

O critério de suscetibilidade 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 clima árido e semiárido foi classificado 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 super-úmido foram considerados de baixa suscetibilidade, pois preveem 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.

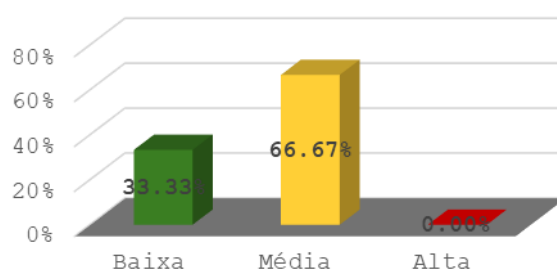


Figura 15: Percentuais de ocorrência à expansão e ao colapso com base no Clima. Fonte: Autora (2024)

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 e Solos Colapsíveis do Ceará (Pedologia e Geologia) (Figuras 16a e 16b, respectivamente)

Quanto à expansão, os solos com baixa suscetibilidade abrangem uma área de 39.878,116 km², os solos de média suscetibilidade abrange uma área de 82.855,290 km², e os solos de alta suscetibilidade compreendem 22.662,918 km² de área.

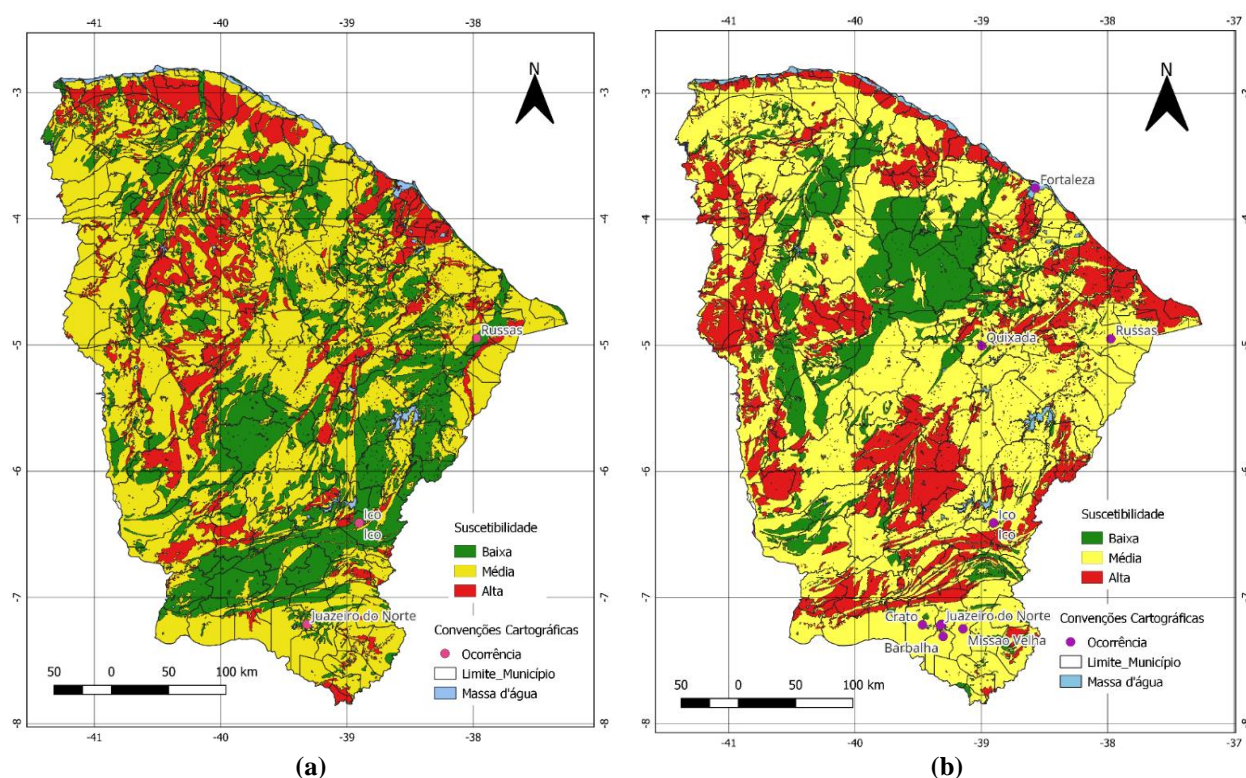


Figura 16: Suscetibilidade de ocorrência de solos do Ceará (Pedologia/Geologia): (a) solos expansivos; (b) solos colapsíveis. Fonte: Autores, 2025.

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

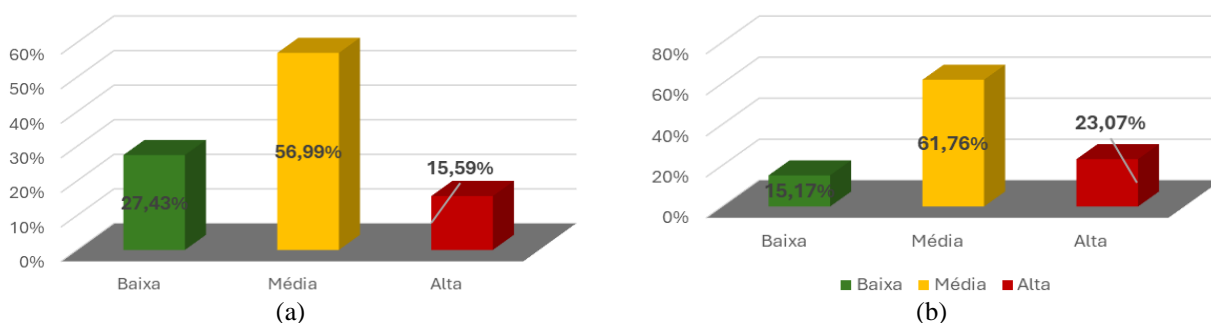


Figura 17: Percentuais de ocorrência de solos expansivos do Ceará em porcentagem (Pedologia e Geologia): (a) expansão; (b) colapso. Fonte: Autores, 2025.

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 e Colapsíveis do Ceará (Pedologia, Geologia e Clima) (Figuras 18a e 18b, respectivamente).

Nas Figuras 19a e 19b são apresentados os percentuais de solos suscetíveis à expansão e colapso respectivamente, para cada carta interpretativa obtida (Pedologia, Geologia e Clima).

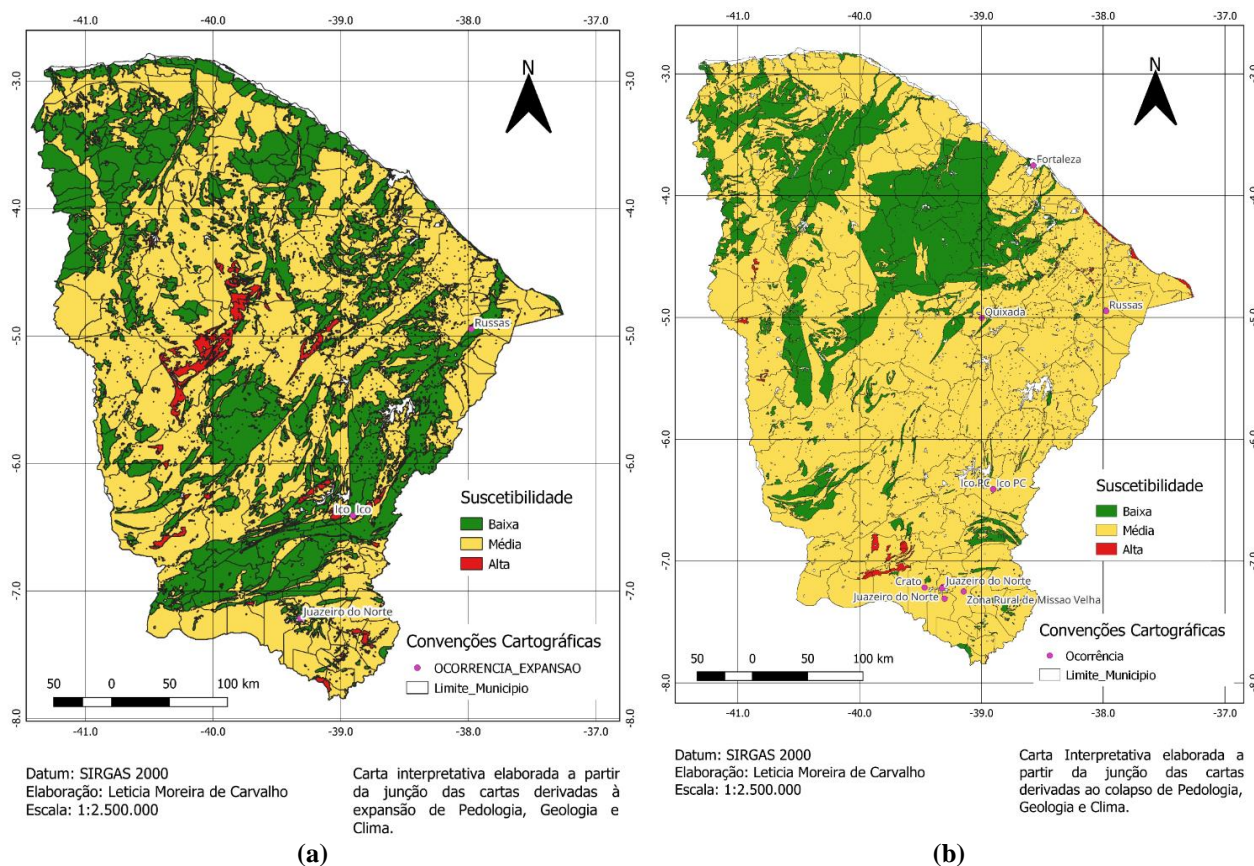


Figura 18: Suscetibilidade de ocorrência de solos do Ceará (Pedologia/Geologia/Clima): (a) solos expansivos; (b) solos colapsíveis. Fonte: Autores, 2025.

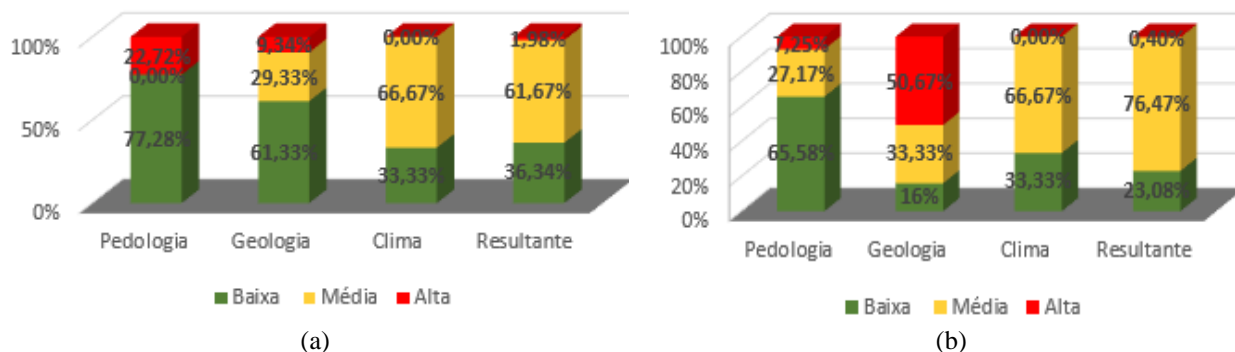


Figura 19: Percentuais de ocorrência de solos do Ceará em porcentagem (Pedologia, Geologia e Clima): (a) expansão; (b) colapso. Fonte: Autores, 2025.

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

Na Tabela 9 tem-se um resumo dos percentuais das suscetibilidades de ocorrência de solos expansivos e colapsíveis do Ceará.

Tabela 9: Resumo das áreas de suscetibilidades 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: Autores (2025)

Ao confrontar os resultados referentes à expansão, foi observado que para a carta interpretativa de Pedologia e 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 um equilíbrio em relação às suscetibilidades, no entanto a média suscetibilidade à expansão continuou prevalecendo.

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. 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 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 Daksanamurthy & 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 21) 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 espaldares do maciço, mas que o núcleo da barragem não colapsa. Na Tabela 10 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 10: Ocorrências de Solos Expansivos e Colapsíveis (Bibliografia versus Carta Interpretativa)

Autor	Local	Solo (Bibliografia)	Suscetibilidade na carta	
			Expansão	Colapso
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; Carneiro (2016)	Icó	colapso	Baixa	Média
Guilherme et. al (2016)	Barbalha	colapso	Baixa/Média	Média
Xavier (2018)	Juazeiro do Norte	colapso	Baixa/Média	Não detectável
Alexandre et. al (2020)	Juazeiro do Norte	colapso / expansão	Baixa/Média	Não detectável
Bandeira <i>et al.</i> (2020)	Crato	colapso	Média	Média
Diógenes (2021)	Russas	expansão	Baixa	Média
Rodrigues et. al (2022)	Juazeiro do Norte	colapso	Baixa/Média	Não detectável

Fonte: Autores 2025.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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.

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.

REFERÊNCIAS

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

ANDRADE, R. F. Mapeamento geotécnico preliminar em escala de semi-detalle (1:25.000) da área de expansão urbana de Uberlândia - MG. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, p. 135, 2005.

AQUINO, A.E.B. 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. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco**, Recife, 199f, 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.

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

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

ATAIDE, S. O. F. Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco**, Recife, p. 118, 2017.

BANDEIRA, A. P. N.; SOUZA NETO, J. B.; ROLIM, J. I. D. **Recalque por colapso do solo e suas manifestações patológicas**. In: XIII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas: Crato – CE. **Congresso[...]** Crato – CE. p. 303-319, 2017.

BANDEIRA, A. P. N. Estudo de um solo colapsível no município do Crato-CE. In: PIRES, Plínio Ferreira. *Engenharia e Geotecnia: Princípios Fundamentais*. 3ed. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, p.415-426, 2020.

BARBOSA, H. Análise da Colapsibilidade do Solo de um Trecho do Projeto Cinturão das Águas do Ceará. In: VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturado. Fortaleza - CE, p. 1-9. 2015.

BATISTA, V. S. Potencial do uso de resíduo de mineração de rocha calcária para estabilização de solos expansivos. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, Natal/RN, 100f, 2021.

BORGES, J. J. S.; FERREIRA, S. R. M.; AMORIM, S. F. 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, p. 140-155, 2023.

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

CHAGAS, G. S.; MOURA, A. S.; CARNEIRO, A. A. 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, G. S.; MOURA, A. S.; CARNEIRO, A. A. 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, 2019.

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

CHRIST, C. E. Mapeamento geotécnico e análise da suscetibilidade a deslizamentos na ilha de Santa Catarina. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, p. 191, 2019.

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

CONSTANTINO, C. S. Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz. 2018. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco**, Recife, p. 98, 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, p. 193-209, 1982.

CPRM - Campanha de Pesquisa de Recursos Minerais. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Ceará. DNPM, Governo do Estado do Ceará, 2021.

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

FERREIRA, S.R.M. **Aplicações da Classificação e Levantamentos Pedológicos aos Estudos dos Solos Colapsíveis e Expansivos**. Revista Ciência e Tecnologia na Universidade Federal de Uberlândia, v 1. p. 119-136, 1993.

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

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

FERREIRA, S.R.M. **Mapa de Risco a Colapsibilidade e Expansividade de Solos do Estado**

de Pernambuco - Geotecnia Ambiental. Relatório Técnico do CNPQ, p. 100, 1999.

FERREIRA, S.R.M. **Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil.** In: Simpósio Brasileiro De Solos Não Saturados, 7, v.2. p. 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. Recife, 2008.

FREITAS, M. L. R. A. Comportamento geomecânico de um solo colapsível de Petrolina - PE avaliado por meio de ensaios de campo e laboratório. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco,** Recife, p. 145, 2017.

FUTAI, M.M.; SUZUKI, S. **Curvas de retenção de água e funções de permeabilidade de solos tropicais naturais.** COBRAMSEG: Curitiba. ABMS, 2010.

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, pp. 731-747. 2017. DOI: 10.1590/S1413-41522017157490.

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

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

GUILHERME, L. C. **Avaliação do potencial de colapso de um solo do município de Barbalha-CE.** In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Juazeiro do Norte. Minas Gerais: ABMS. p. 1-7. 2016.

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

HOLANDA, M. J. O. **Solos colapsíveis e expansivos no Brasil:** classificação da suscetibilidade de ocorrência aplicando redes neurais artificiais. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco,** Recife, p. 158, 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.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Banco de Dados de Informações Ambientais. Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias. Rio de Janeiro. 82 p IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf> Acesso em: 12 mar. 2023.

JACOMINE, P. K. T. **Solos do Nordeste: características, distribuição e aptidão agrícola.** 2. ed. Recife: Embrapa Solos, 2009.

LÔBO NETO, J. B. Um estudo experimental e numérico de solos compactados colapsíveis:

aplicação em uma pequena barragem de terra. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará.** Fortaleza -CE, p. 169, 2013.

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

MEDEIROS, C. N.; LIMA, J. R.; MOREIRA, L. L.; ALMEIDA, N. C.; MONTEIRO, R. M. L.; SOARES, V. L. 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, M. B. Comportamento de solos colapsíveis da região de Bom Jesus da Lapa - Bahia. **Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, p. 281., 1990.

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

MONTEIRO, A. F. Modelação de um SIG para a Cartografia Geotécnica com recurso a plataformas de código aberto e livres. Área urbana da Guarda. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade da Beira Interior,** Covilhã, p. 311, 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.

NOÉ, Y.; ELENA, H.; MORALES P., C.; LEDESMA, F. **Sistemas de Información Geográfica com Qgis 2.x.** Salta. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. P. 17. Disponível em: <http://www.idesa.gob.ar/documentacion-idesa/>. Acesso em: 12 dez. 2015.

OLIVEIRA, C. M. G. Carta de risco de colapso de solos para a área urbana do município de Ilha Solteira – SP. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira,** Ilha Solteira, p. 128, 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 Geojuvem, Nova Friburgo/RJ. 2006.

OLIVEIRA, B. R. Cartografia Geotécnica de Grande Escala: Estudo de Caso Setor Habitacional Asa Taquaricartografia Geotécnica de Grande Escala: Estudo de Caso Setor Habitacional Asa Taquari. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília,** Brasília, p. 260, 2018.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. F.; SILVA, J. A.; ARAÚJO JÚNIOR, E. L.; BELLO, M. I. M. C. V.

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. São Paulo: ABEF, p. 1-8. 2019.

PAIVA, S. C.; LIMA, M. A. A.; FERREIRA, M. G. V. X.; FERREIRA, S. R. M. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal.** *Matéria (Rio de Janeiro)*, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 437-449, FapUNIFESP (SciELO). 2016. <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. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina.** Florianópolis, p. 160, 2003.

RODRIGUES, F. S.; SILVA, L. A.; ALEXANDRE, C. C.; BANDEIRA, A.P.N.; SOUZA NETO, J.B. **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, 2020, Juazeiro do Norte. Anais [...] . São Paulo: SBMR, p. 1-6, 2020.

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

SANTOS, V. E. C.; PEREIRA, G. F. C.; MEDEIROS, I. S.; SANTOS, M. M. B. **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. Companhia Brasileira de Produção Científica. 2021. <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, M. J. R. Comportamento Geomecânico de Solos Colapsíveis e Expansivos em Petrolina PE: Cartas de Suscetibilidade. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco,** Recife, 124 f., 2003.

SILVA, A. C. **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, 2022, Recife. Congresso. [S.L.]: Geojovem, p. 1-8. 2022.

SILVA, O. S. Estudo de propriedades Geotécnico de um Solo Argiloso, Potencialmente Expansivo, Compactado com e sem Adição de Cal. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco.** p. 150, 2012.

SILVEIRA, P. E. M.; REIS, F. A. G. V. Elaboração de cartas geotécnicas aplicadas a solos colapsíveis em áreas urbanas utilizando o método do detalhamento progressivo. *Geologia USP. Série Científica*, 21, 2, pp. 91- 106. 2021. <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, Rio de Janeiro, p.569-588, , 1981.

SOBRAL, H.S., **Contribuição ao estudo de Massapê como solo para construção, Tese para**

Cátedra de Materiais 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. Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso). **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, p. 432, 2004.**

SOUZA, L. A. 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. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, p. 46., 2015.**

TAVARES, C.M.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.I.; CALADO, A.C.A.; FERREIRA, S.R.M. **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, ABMS. 2020.

VALLEJO, L.I.G., FERRER, M., ORTUNO, L., OTEO, C. **Ingenieria Geologica.** 2004thed. Madrid: Prentice Hall Pearson Educación. 2002.

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, p. 415-440, 2015.

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. Mapas de Suscetibilidade de Solos Colapsíveis e Expansivos do Estado de Pernambuco. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, p. 93., 2001.**

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