



ISSN: 2525-815X

# Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: [www.jeap.ufpe.br/](http://www.jeap.ufpe.br/)

10.24221/jeap.8.2.2023.5681.140-155



## Utilização do sistema de informação geográfica para identificar solos colapsíveis na região do semiárido brasileiro

### Using geographic information systems to identify collapsible soils in the Brazilian semi-arid region

Jesce John da Silva Borges<sup>a</sup>, Silvio Romero de Melo Ferreira<sup>b</sup>, Samuel França Amorim<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. Avenida Professor Moraes Rego, n. 1235, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 50670-901. E-mail: [jesce.john@ufpe.br](mailto:jesce.john@ufpe.br), [silvio.mferreira@ufpe.br](mailto:silvio.mferreira@ufpe.br), [samuel.famorim@ufpe.br](mailto:samuel.famorim@ufpe.br).

#### ARTICLE INFO

Recebido 03 Abr 2023

Aceito 20 Jun 2023

Publicado 29 Jun 2023

#### ABSTRACT

Collapsible soils can be responsible for serious problems in engineering and construction projects. The objective of this paper is to present the map of susceptibility of the occurrence of collapsible soils for the Brazilian Semi-arid Region based on climatological and pedological constraints, using a Geographic Information System. The Thornthwaite climatic classification and the Brazilian Soil Classification System were considered for this, and the mapping units were categorized into three levels of occurrence susceptibility of collapsible soils: high, medium, and low. The results show high susceptibility in 50.5% of the semi-arid region, medium in 18.4%, and low in 30.2%. Water bodies covered 0.9%. Verification of the methodology adopted in this study showed a reliability of 87.1% when compared to records found in the literature. Of the water bodies present in the study region (411 reservoirs), 14.8% are found in high susceptibility areas, 27.7% in medium susceptibility areas, and 57.4% in low susceptibility areas. The result of this study serves as a guide for land use and occupation and allows the formulation of guidelines for the planning of engineering projects in the Brazilian semiarid region. **Keywords:** Map, susceptibility, climate, pedology.

#### RESUMO

Os solos colapsíveis são responsáveis por sérios problemas em obras de engenharia. Este artigo tem como objetivo apresentar a carta de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis para a Região do Semiárido brasileiro com base nos condicionantes climatológico e pedológico, resultante da utilização do Sistema de Informação Geográfica. Para isto, foi considerada a classificação climática de Thornthwaite e o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, sendo as unidades de mapeamento categorizadas em três níveis de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis: alta, média e baixa. Os resultados apontaram suscetibilidade alta em 50,5%, média em 18,4% e baixa em 30,2% da área do Semiárido. Os corpos de água representam 0,9%. A verificação da metodologia adotada neste estudo atingiu 87,1% de confiabilidade quando comparada aos registros de ocorrência encontrados na literatura. Das obras hídricas presentes na região, 411 reservatórios, 14,8% estão inseridos em área de suscetibilidade alta, 27,7% em área de média suscetibilidade e 57,4% em área de baixa suscetibilidade. O resultado da pesquisa serve para orientar o uso e a ocupação do solo, bem como permitir a formulação de diretrizes para planejamento das obras de engenharia na região do Semiárido brasileiro.

**Palavras-Chave:** Carta, suscetibilidade, clima, pedologia.



#### Introdução

Solos colapsíveis são caracterizados pela redução brusca de volume em virtude do rearranjo

da estrutura do solo, ocasionado pelas solicitações de carga ou pelo acréscimo do grau de saturação do solo, seja por razão de infiltração de águas pluviais,

fissuras em tubulações enterradas, elevação do lençol freático e até mesmo rupturas de fossas (Campos & Santos, 2019). Essa variabilidade volumétrica, dependendo de sua magnitude, pode causar danos significativos em edificações, comprometendo sua estabilidade.

Solos colapsíveis encontram-se presentes em regiões áridas e semiáridas. São considerados solos problemáticos e constituem um desafio para engenharia geotécnica. As ligações entre as partículas do solo podem ser formadas pela cimentação de materiais finos (sais ou argila) e/ou por forças capilares (sucção). A molhagem por chuvas, subida das águas subterrâneas, ou por atividades humanas causam quebras das ligações cimentantes entre as partículas de estrutura meta instáveis, reduz a sucção e o volume do solo, ocasionando problemas nas edificações e nas instalações construídas sobre eles.

Solos colapsíveis são encontrados em muitas partes do mundo, Estados Unidos da América, Brasil, Argentina, Uruguai, Espanha, Austrália, Kuwait, Egito, Irã, Sul África e China, particularmente em áreas áridas e semiáridas dessas regiões (Dudley, 1970). A maioria das ocorrências em solo naturais colapsíveis são areias em depositados eólicos (Aitchison, 1973; Jennings & Knigh, 1975; Clemence & Finbarr, 1981; Ferreira, 1995; Rafie, Moayed, & Esmaeli, 2008; Ayadat & Hanna, 2012; Mahmood & Abraham, 2021; Opukumo et al., 2022).

As patologias observadas nas edificações são fissuras, trincas, rachaduras ou mesmo a ruptura ocasionando perdas econômicas e até mesmo perda de vidas em alguns casos (Houston et al., 2001; Sun et al., 2013). As perdas econômicas podem chegar a vários bilhões de dólares. No sul da Califórnia, Lawton, Fragaszy & Hetherington (1992) estimaram danos com infraestrutura e litígios causados pelos solos colapsíveis em torno de US\$ 100 milhões. Na Bulgária, Jefferson et al. (2005) presumiram que, nas últimas décadas, os danos são superiores a US\$ 100 milhões. Há várias perdas não quantificadas oriundas do comportamento colapsível (Rodrigues & Vilar, 2013). Danos em edificações apoiadas em solos colapsíveis foram encontrados em conjuntos habitacionais (Aragão & Melo, 1982; Marinho, 2018) e em canais de irrigação (Riani & Barbosa, 1989; Mendonça, 1990; Fucale, 2000; Mendonça Neto, 2011).

Diversas soluções técnicas são encontradas na literatura visando o tratamento de solos colapsíveis, podendo ser citadas: substituição do solo colapsível no caso de pequena profundidade (Al Rawas, 2000), execução de colunas de deslocamento (Ayadat & Hanna, 2005), utilização

de mistura de pó de ferro (Alshaba, Abdelaziz & Ragheb, 2018), adição de escória granulada e pozolana natural (Ziani et al., 2019), compactação com sonda vibratória (Gao et al., 2020; Gao et al., 2021), utilização de misturas de polietilenoglicol - nanolima (Zimbaro et al., 2020) e uso de misturas de nanomateriais - nano-sílica, nano-argila e nano-carbonato de cálcio (Haeri & Valishzadeh, 2021).

Devido ao comportamento de variação de volume com a inundação dos solos colapsíveis, a investigação geotécnica é fundamental para o sucesso do projeto e para a prevenção de danos às estruturas e fundações, de modo a quantificar e prever a grandeza do colapso que poderá ocorrer. Ferreira (1995) dividiu os métodos de identificação de solos colapsíveis em dois grandes grupos: métodos diretos e métodos indiretos. Dentre os métodos indiretos, destacam-se os orientativos com base em dados da pedologia, climatologia e geologia (Ferreira, 1999).

A cartografia geotécnica, através do uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG), tem sido bastante utilizada para a definição da suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis, despontando como uma importante ferramenta no processo de identificação de solos problemáticos. Lollo (2012) assevera que a cartografia fornece as informações fundamentais para intervenções visando eliminar ou reduzir os danos oriundos do colapso seja com base em soluções normativas, de projeto, ou construtivas.

Estudos cartográficos envolvendo a suscetibilidade ao colapso foram elaborados para alguns locais do Brasil. Utilizando levantamentos climatológicos, pedológicos e geológicos, Vasconcelos (2001) e Amorim (2004) elaboraram cartas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos para o Estado de Pernambuco, classificando as unidades de mapeamento em três níveis de suscetibilidade: alto, médio e baixo. Similarmente, Silva (2003) e Aquino (2020) desenvolveram documentos cartográficos para exposição de suscetibilidade ao colapso e à expansão para cidade de Petrolina-PE e Teresina-PI, respectivamente.

Zaine (2000) estudou o mapeamento geológico-geotécnico e a representação cartográfica de unidades geotécnicas para a área urbana de Rio Claro-SP. Andrade (2005) elaborou o mapa de materiais inconsolidados com características colapsíveis para a área de expansão do município de Uberlândia-MG. Christ (2014) elaborou mapas de suscetibilidade ao colapso para a região da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição-SC. Margoto & Aparecido Júnior (2016), com base na análise pedológica-geológica, apresentam proposta para criação de mapa de risco

de colapso para a área urbana do município de Campos Gerais-MG. Silveira & Reis (2021) elaboraram cartas geotécnicas aplicadas a solos colapsíveis em áreas urbanas utilizando o método do detalhamento progressivo.

A região semiárida do Brasil apresenta uma série de casos de problemas em obras de engenharia relacionadas a solos colapsíveis, principalmente em edificações, barragens e canais. Nessa região foram encontrados solos colapsíveis em diversos locais, podendo ser citados os seguintes registros: Carvalho (1994) - Águas Vermelhas/MG, Araçuaí/MG, Jenipapo de Minas/MG e Salinas/MG, Martínez (2003) - Areia/PB, Guilherme et al. (2016) - Barbalha/CE, Burgos, Fonseca & Campos (2010) - Barreiras/BA, Mendonça (1990) - Bom Jesus da Lapa/BA, Barbosa, Bandeira & Guilherme (2016) - Brejo Santo/CE e Missão Velha/CE, Ferreira (1988) - Cabrobó/PE, Carnaíba/PE, Crato/CE, Floresta/PE, Gravatá/PE, Santa Maria da Boa Vista/PE e Rodelas/BA, Brindeiro et al. (2018) - Casa Nova/BA, Chagas, Moura & Carneiro (2019) - Icó/CE, Wolle, Benvenuto & Carvalho (1981) - Jaíba/MG e Manga/MG, Xavier (2018) - Juazeiro do Norte/CE, Custódio et al. (2004) - Malhada/BA, Mendonça Neto (2011) - Parnaíba/PI, Ferreira (1995) - Petrolândia/PE e Petrolina/PE, Ferreira e Fucale (2014) - Salgueiro/PE, Araújo et al. (2018) - São Bento do Norte/RN, Aquino (2020) - Teresina/PI e Menezes, Bahiano Filho & Viana (2018) - Vitória da Conquista/BA.

As regiões de clima árido e semiárido representam aproximadamente 29,8% da superfície da Terra (Wang et al., 2018). O aquecimento global e as mudanças climáticas associadas aumentam o risco de fenômenos extremos que acarretam diretamente secas e chuvas intensas (Tang et al., 2021). As regiões áridas e semiáridas são mais vulneráveis ao aquecimento global, podendo aumentar a área total de terra seca globalmente (Dai, 2013).

Atualmente, a região semiárida do Brasil é delimitada de acordo com os critérios aprovados pelas Resoluções do Conselho Deliberativo da Sudene de nº 107, de 27/07/2017 e de nº 115, de 23/11/2017. O Semiárido brasileiro corresponde uma área 1.127.953 km<sup>2</sup>, representando 13,2% do Brasil e 64,8% do Nordeste (Silva & Mota, 2020). Está constituído por 1.262 municípios, destes, 92,5% encontram-se no Nordeste e 7,5% no estado de Minas Gerais. Apresenta uma população estimada em 27.870.241 habitantes e densidade demográfica de 25 hab. km<sup>-2</sup>.

O Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE), em publicação

no Diário Econômico, em 2 de dezembro de 2019, ressalta que a Região Nordeste aumentou a sua participação no PIB Nacional com um acréscimo de 1,39 ponto percentual, passando de 13,09% registrado em 2002 para 14,48% registrado em 2017. O estudo supracitado conclui que o PIB do Nordeste cresce acima da média nacional no balanço das mudanças recentes, considerando a evolução do PIB do Nordeste compreendida entre 2002 e 2017 (Leão, 2019).

A infraestrutura hídrica do semiárido brasileiro apresenta 452 reservatórios monitorados, totalizando uma capacidade máxima de armazenamento de 40,25 mil hm<sup>3</sup> de água (Medeiros et al., 2017). A Agência Nacional de Águas (2023) afirma que o módulo Nordeste e Semiárido do Sistema de Acompanhamento de Reservatório (SAR) engloba informações de mais de 500 reservatórios contidos nos nove estados da Região Nordeste e em Minas Gerais, sendo acompanhados pela referida agência. Somando-se a isso, numerosos projetos, obras e investimentos são realizados na região Semiárida, cabendo destaque para os projetos de irrigação e de integração da Bacia do São Francisco.

Mendonça Neto & Ferreira (2015) analisaram a variação de volume devido à inundação de um solo colapsível utilizado em um canal de irrigação do projeto de integração da Bacia do São Francisco. Destacam a importância da fase de identificação do solo colapsível e dos estudos de colapsividade previamente à construção dos canais para evitar danos ou mesmo a ruptura completa da estrutura.

O artigo tem como objetivo apresentar a carta de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis para a Região do Semiárido brasileiro, com base no condicionante climatológico e pedológico, resultante da utilização do Sistema de Informação Geográfica.

## Material e Métodos

Para compreender o comportamento colapsível do solo, é fundamental estabelecer uma distinção entre os termos recalque e colapso. O primeiro consiste no movimento vertical descendente de um elemento estrutural, resultante da deformação do solo decorrente da aplicação de uma determinada tensão. O segundo também está relacionado à deformação do solo, porém representa um fenômeno que ocorre após o recalque, sem aumento de tensão, originado pela redução da sucção. Ambos os termos são apresentados, esquematicamente, na Figura 1.

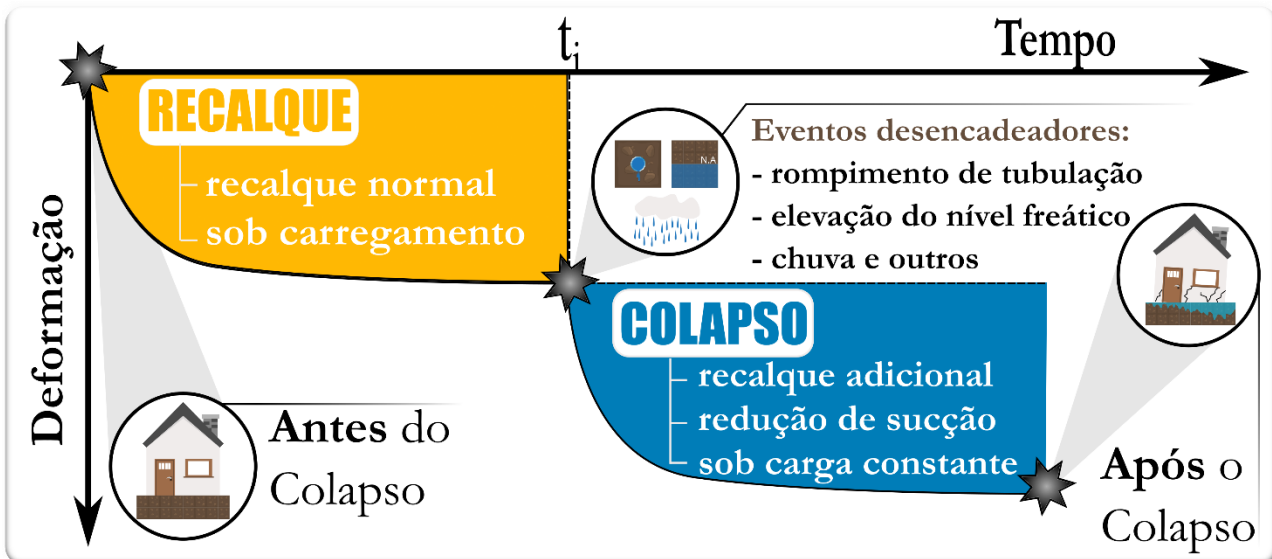


Figura 1. Recalque, colapso e patologia na edificação. Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

Há solos Verdadeiramente Colapsíveis que colapsam sobre peso próprio quando há redução de sucção e os Condicionados ao Colapso que só colapsam a partir de uma determinada tensão quando a sucção é reduzida (Reginatto & Ferrero, 1973; Popescu, 1986). Um solo colapsível é capaz de resistir a uma tensão vertical aplicada

comparativamente grande com uma pequena quantidade de assentamento e com um pequeno teor de água. No entanto, esse solo pode sofrer assentamento, que pode ser alto, ao molhar sem qualquer aumento adicional de tensão. Os ensaios edométricos permitem avaliar a colapsibilidade de um solo, podendo ser simples ou duplo (Figura 2).

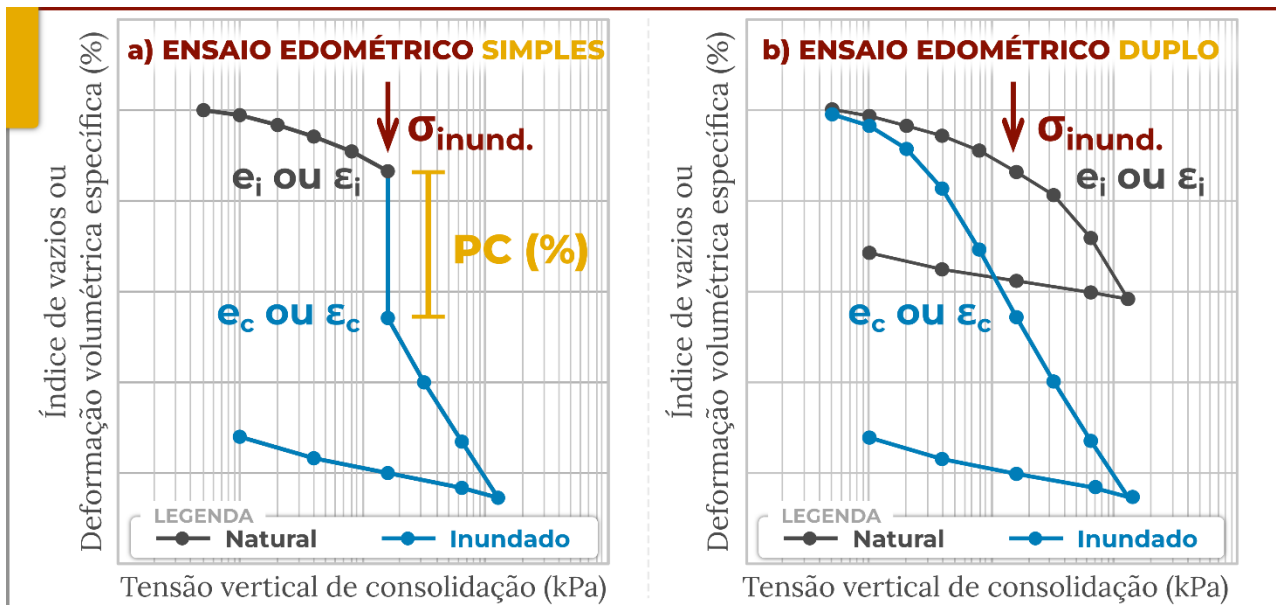


Figura 2. Variação de volume com inundação: a. Ensaio Edométrico Simples; b. Ensaio Edométrico Duplo. Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

O Potencial de Colapso (PC) é a quantidade percentual relativa de colapso do solo calculada, a partir da Equação 1, em qualquer estágio de tensão.

$$PC = 100 \frac{(e_i - \varepsilon_c)}{1 + e_i} = 100 \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_c)}{1 - \varepsilon_i} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde: PC = Potencial de Colapso para a tensão de inundação;  $\sigma_{inund.}$  = tensão de inundação;  $e_i, \varepsilon_i$  = índice de vazios ou deformação volumétrica específica até a tensão considerada sob umidade natural (antes da inundação);  $e_c, \varepsilon_c$  = índice de vazios ou deformação volumétrica específica alcançada em consequência da inundação (após a inundação).

As características geotécnicas dos solos colapsíveis estão inter-relacionadas com as classes de solos definidas em levantamentos pedológicos (Mapa de Solos do Brasil) e com os condicionantes climatológicos. Elabora-se, a partir de mapas fundamentais de clima e solos, cartas derivadas e a partir dessas, cartas interpretativas de suscetibilidade à ocorrência dos solos colapsíveis em uma dada região (no caso Semiárido brasileiro).

Os dados geotécnicos dos solos colapsíveis, oriundos do levantamento de Ferreira (1999) e Silva (2022), foram utilizados para realizar a validação da proposta.

A Figura 3 mostra o cenário dos métodos de identificação aplicados para os referidos dados.

A Figura 3a apresenta os registros enquadrados como solos colapsíveis, seguindo o critério de Vilar & Ferreira (2015) e a Figura 3b mostra o enquadramento, segundo o critério de Reginatto & Ferrero (1973), sendo 75% dos registros classificados como condicionados ao colapso e 25% como verdadeiramente colapsíveis. Por fim, sob a tensão de inundação de 200 kPa, a Figura 3c apresenta o cenário resultante, seguindo o critério de Jennings & Knighth (1975), quando foram constatados 37,31% dos registros classificados como problemáticos, 31,34% como problemas moderados, 26,87% como problemas graves e 4,48% como sem problemas (Silva, 2022).

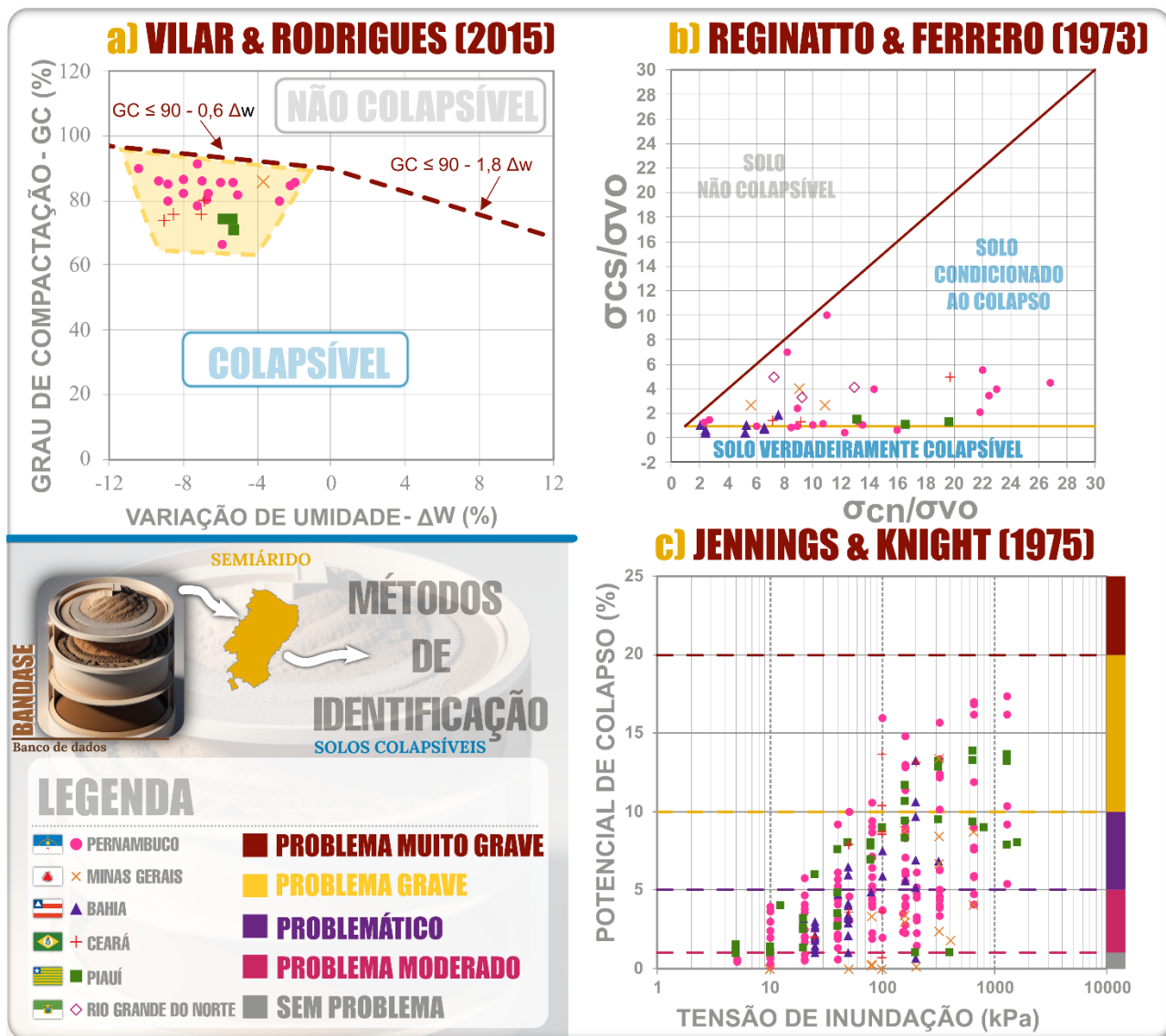


Figura 3. Enquadramento dos registros de ocorrência perante métodos de identificação: a) Vilar & Ferreira (2015), b) Reginatto & Ferrero (1973) e c) Jennings & Knighth (1975). Fonte: Adaptado de Silva (2022).

As principais características geotécnicas dos solos colapsíveis e dos locais de ocorrência são solos não saturados; os grãos estão ligados por vínculos de argilas, óxidos de ferro, alumínio e

carbonatos, formando uma estrutura metaestável; são de origem recente e ocorrem em regiões onde a taxa de evapotranspiração é sempre maior do que a de precipitação; ocorrem também em regiões



tropicais em que há lixiviação dos finos nos horizontes mais superficiais e onde alternam estações de seca e chuvas concentradas em curto período de tempo (Clemence & Finbarr, 1981; Ferreira, 1995; Mendonça Neto & Ferreira, 2015; Vilar & Ferreira, 2015; Li, Vanapalli & Li, 2016; Opukumo et al., 2022).

Os levantamentos dos solos para a sua identificação e classificação de unidades pedológicas dão indicação da ocorrência do lençol d'água (quando localizado nas camadas ou horizontes mais superficiais), do grau de saturação, da consistência, da macroestrutura e da porosidade, da atividade e da presença de minerais expansivos, das características de drenagem, permeabilidade e erodibilidade (Moniz, 1973; Antunes et al., 2013; Antunes & Salomão, 2018; Silva, Bello & Ferreira, 2020).

A metodologia utilizada na elaboração das cartas de suscetibilidade à solos colapsíveis para a região do Semiárido brasileiro envolveu o emprego do Sistema de Informação Geográfica-SIG para armazenar, analisar, manipular, processar e apresentar os dados geográficos. O programa de SIG utilizado neste estudo foi o QGIS 3.22.6, versão de longa duração.

No que se refere à base cartográfica, foram utilizados, no formato vetorial, o mapa de delimitação do Semiárido, o mapa de classificação climática de Thornthwaite e a classificação pedológica do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Os referidos mapas apresentam,

respectivamente, as seguintes escalas: 1:1.000.000, 1:1.000.000 e 1:5.000.000.










Realizou-se a compatibilização do sistema geodésico de referência, aplicando, no ambiente do QGIS, o SIRGAS2000 (código EPSG 4674) para o projeto e as camadas vetoriais. Tal procedimento foi fundamental para viabilizar as análises espaciais. O sistema de coordenadas adotado foi o geográfico, devido à extensão da área de estudo.

Nos dados vetoriais foi realizada a análise das topologias, buscando identificar e corrigir erros de vetorização tais como: sobreposições, lacunas, geometrias inválidas e outros. Para isto, utilizou-se o recurso denominado verificador de topologia. Em seguida, os problemas das camadas vetoriais foram sanados mediante a aplicação da ferramenta denominada "corrigir geometrias".

Posteriormente, realizou-se o recorte do mapa de delimitação do Semiárido sobre o mapa de classificação climática e pedológica do Brasil. Esse procedimento foi realizado através da ferramenta de geoprocessamento chamada "recortar", tendo como resultado o mapa de classificação climática e pedológica para o Semiárido.

O critério adotado para atribuição da suscetibilidade ao colapso, com base na classificação climatológica é fundamentado na metodologia apresentada por Ferreira (1999), utilizada nos estudos de Vasconcelos (2001), Silva (2003), Amorim (2004) e Aquino (2020) (Tabela 1).

Tabela 1. Atribuição dos níveis de suscetibilidade climática dos solos colapsíveis, segundo os índices de umidade de Thornthwaite & Mather (1955). Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

Cor	Tipos climáticos	Índice de Umidade ( $I_u$ )	Suscetibilidade
	A - Superúmido	$100,0 \leq I_u$	BAIXA
	B4 - Úmido	$80,0 \leq I_u < 100,0$	BAIXA
	B3 - Úmido	$60,0 \leq I_u < 80,0$	BAIXA
	B2- Úmido	$40,0 \leq I_u < 60,0$	BAIXA
	B1- Úmido	$20,0 \leq I_u < 40,0$	BAIXA
	C2 - Subúmido	$0,0 \leq I_u < 20,0$	MÉDIA
	C1 - Subúmido seco	$-33,3 \leq I_u < 0,0$	MÉDIA
	D - Semiárido	$-66,7 \leq I_u < -33,3$	ALTA
	E - Árido	$-100,0 \leq I_u < -66,7$	ALTA

Ressalta-se que, neste estudo, o tipo climático subúmido (C2) foi enquadrado, diferentemente da metodologia mencionada, na suscetibilidade média. Tal medida visa trazer coerência com o quantitativo de ocorrência registrado na literatura.

A Tabela 2 apresenta, resumidamente, a atribuição dos níveis de suscetibilidade ao colapso com base na classificação pedológica, sendo exposto o grupo de componentes formadores das

unidades de mapeamento e o nível de suscetibilidade atribuído.

Frisa-se que foi aplicada a suscetibilidade para a condição mais desfavorável dentre os três componentes formadores da unidade de mapeamento, ou seja, se apenas um componente apresenta alta suscetibilidade, será atribuído o nível alto para unidade de mapeamento. Se nenhum componente apresenta alta suscetibilidade, mas algum consta média suscetibilidade, será atribuído

o nível médio para unidade de mapeamento. Consequentemente, se todos os componentes

apresentam baixa suscetibilidade, o nível atribuído para a unidade de mapeamento será baixo.

Tabela 2. Atribuição dos níveis de suscetibilidade pedológica dos solos colapsíveis, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos et al., 2018). Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

Componentes formadores das unidades de mapeamento	Suscetibilidade
Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos, Cambissolos Háplicos Tb Distróficos, Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos, Gleissolos Háplicos Tb Distróficos, Gleissolos Sálidos Sódicos, Luvisolos Crômicos Órticos, Luvisolos Crômicos Pálicos, Neossolos Flúvicos Ta Eutróficos, Neossolos Litólicos Distróficos, Neossolos Litólicos Eutróficos, Neossolos Regolíticos Eutróficos, Planossolos Háplicos Eutróficos, Planossolos Nátricos Órticos, Plintossolos Háplicos Distróficos, Plintossolos Pétricos Concrecionários, Vertissolos Ebânicos Órticos, Vertissolos Háplicos Órticos	BAIXA
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos, Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos, Argissolos Vermelhos Distróficos, Argissolos Vermelhos Eutróficos, Chernossolos Argilúvicos Órticos, Chernossolos Rêndzicos Órticos	MÉDIA
Latossolos Amarelos Distróficos, Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, Latossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos, Latossolos Vermelhos Distróficos, Latossolos Vermelhos Eutróficos, Neossolos Quartzarênicos Órticos	ALTA

Os critérios adotados são resumidos para fins de atribuição das suscetibilidades ao colapso da seguinte forma: suscetibilidade alta ocorre quando se constata compatibilidade elevada entre as características das classes pedológicas e as características dos solos colapsíveis, suscetibilidade média ocorre quando se constata uma condição intermediária entre os dois limites de suscetibilidade, e por fim, suscetibilidade baixa ocorre quando se constata compatibilidade pequena ou ausente entre as características das classes pedológicas e as características dos solos colapsíveis.

Na tabela de atributos dos mapas fundamentais, utilizando a calculadora de campo, foi criado um campo denominado suscetibilidade, sendo atribuído para cada unidade de mapeamento o seu respectivo critério de suscetibilidade. Em seguida, por meio da ferramenta “simbologia”, aplicou-se a classificação categorizada para o referido campo. Desta forma, definiu-se a carta derivada de suscetibilidade ao colapso para a região do Semiárido brasileiro para os condicionantes climatológico e pedológico.

Na quantificação das áreas, criou-se, na tabela de atributos, um campo denominado “área”, sendo preenchidos, por meio da calculadora de campo, os valores de áreas em km<sup>2</sup>. Tal procedimento teve como finalidade gerar os percentuais de incidência das suscetibilidades ao colapso. A execução da compartimentação, que corresponde a superposição das cartas derivadas climatológica e pedológica, resultou na carta interpretativa de suscetibilidade ao colapso.

A verificação da metodologia aplicada na atribuição da suscetibilidade ao colapso deu-se

através da superposição entre os registros de ocorrência de solos colapsíveis do BANDASE (Ferreira, 1999; Silva, 2022) e a carta interpretativa. Ressalta-se que foram considerados apenas os registros contidos na delimitação territorial do Semiárido, a qual abrange 28 (vinte e oito) municípios.

A exposição do cenário das obras hídricas foi realizada por meio do confronto entre a carta de suscetibilidade e a localização dos reservatórios da região do Semiárido. A relação de 540 reservatórios foi obtida do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da Agência Nacional de Águas (ANA), destes 411 estão inseridos dentro da região do Semiárido (Agência Nacional de Águas, 2023).

### Resultados e Discussão

Constataram-se 117 registros de ocorrência de solos colapsíveis no Semiárido brasileiro inseridos no Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE). Desse total de registro, verificou-se que a maioria (47%) foi encontrada no estado de Pernambuco, totalizando 55 ocorrências. Em seguida, constatou-se que 34 registros (29,1%) estão localizados na Bahia, seguidos por 15 (12,8%) no Ceará, 6 (5,1%) no Piauí, 5 (4,2%) em Minas Gerais, 1 (0,9%) no Rio Grande do Norte e 1 (0,9%) na Paraíba (Figura 4). Os estados de Pernambuco e Bahia, juntos, representam 76,1% dos dados registrados, evidenciando concentração de estudos nesses estados, visto que o quantitativo não tem relação com a extensão territorial sujeita ao comportamento colapsível. A Figura 5 apresenta a distribuição espacial dos locais de ocorrência dos solos colapsíveis para a região do Semiárido.

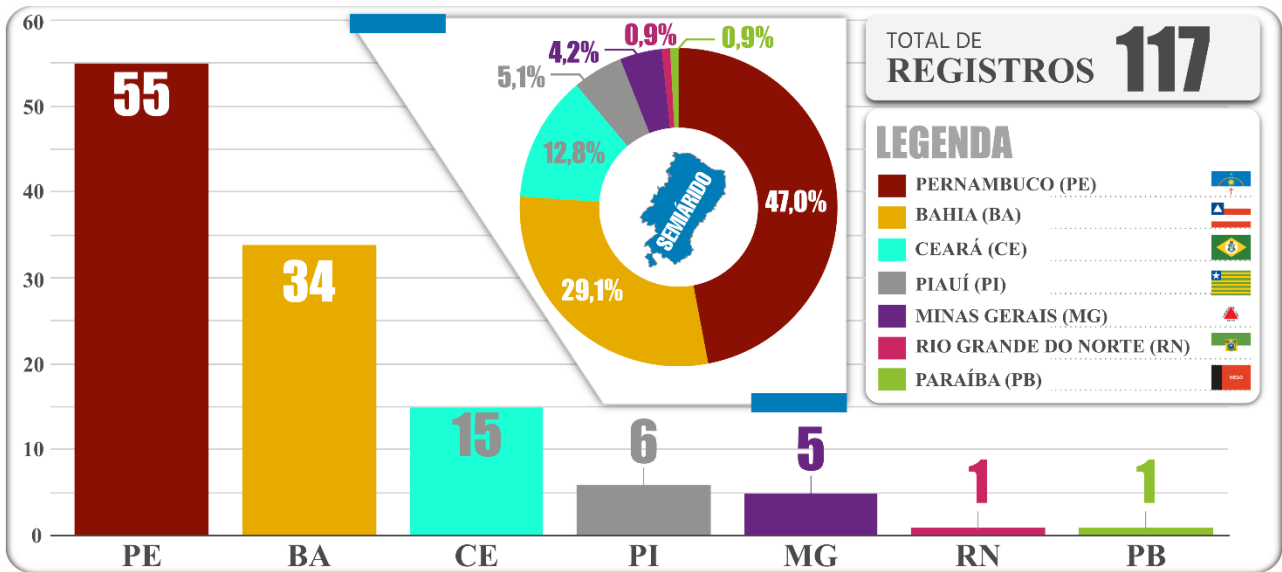


Figura 4. Distribuição dos registros de ocorrência de solos colapsíveis por estado. Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

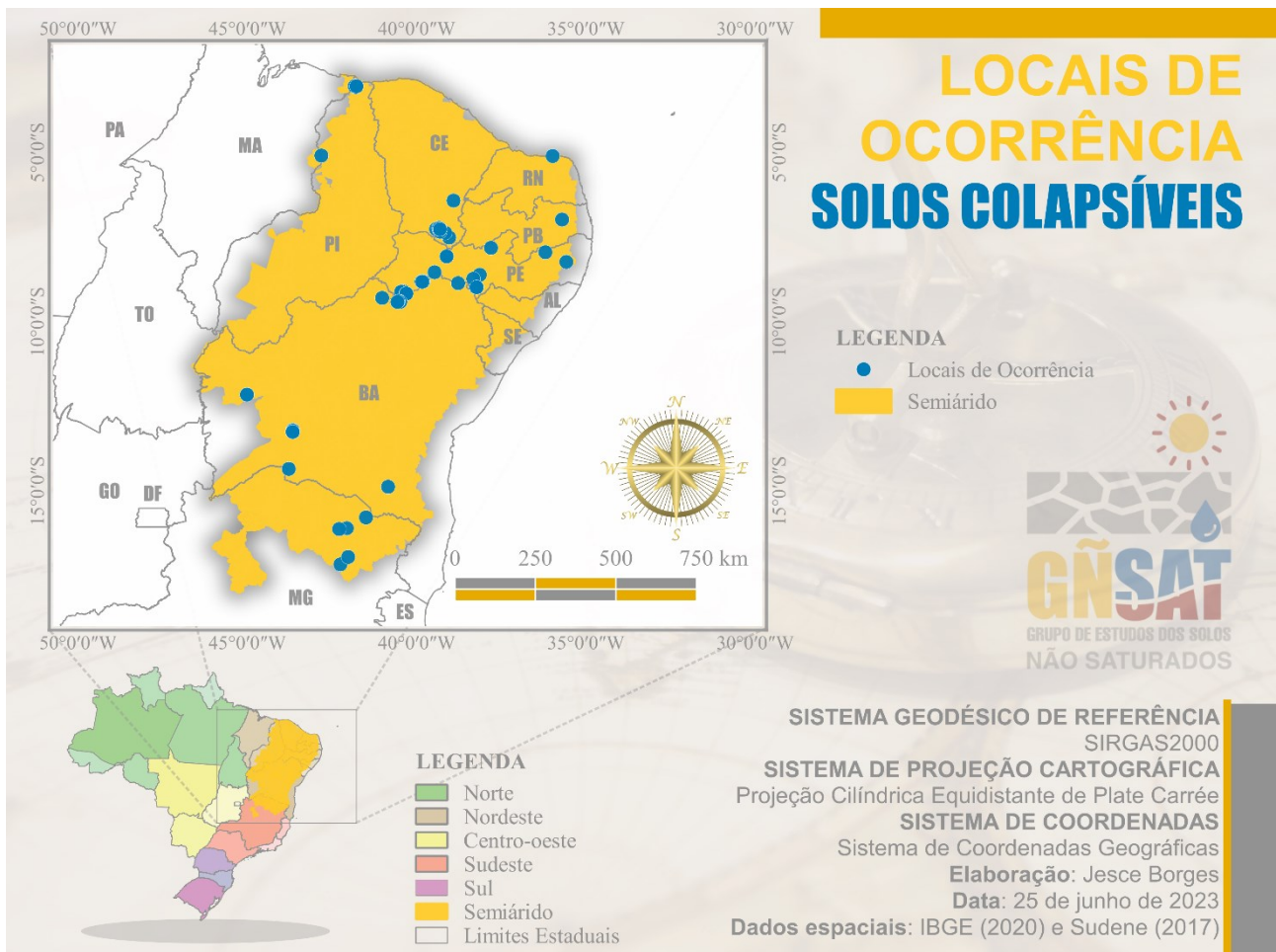


Figura 5. Distribuição espacial dos locais de ocorrência de solos colapsíveis no Semiárido brasileiro. Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

A Figura 6 apresenta os mapas fundamentais para a delimitação do semiárido brasileiro. No território do Semiárido, constataram-se oito tipos climáticos, quantitativo igual ao número de unidades de mapeamento. Essas

tipologias climáticas correspondem aos seguintes quantitativos de área: B4 úmido - 174 km<sup>2</sup> (0,02%), B3 úmido - 3.590 km<sup>2</sup> (0,32%), B2 úmido - 12.217 km<sup>2</sup> (1,08%), B1 úmido - 108.388 km<sup>2</sup> (9,61%), C1 subúmido - 583.308 km<sup>2</sup> (51,72%), C2 subúmido



seco - 382.263 km<sup>2</sup> (33,89%), D semiárido - 37.477 km<sup>2</sup> (3,32%) e E árido - 386 km<sup>2</sup> (0,03%). Consta-se que o tipo climático subúmido seco (C2) prepondera na região do Semiárido, abrangendo mais da metade do território.

Em relação à pedologia, constataram-se 10 classes pedológicas (ordens) e 183 unidades de mapeamento. Essas unidades são caracterizadas até o 3º nível categórico, ou seja, cada unidade é composta pelo 1º nível categórico (ordens), 2º nível categórico (subordens) e 3º nível categórico (grandes grupos). Em termos quantitativos de área,

constataram-se os seguintes valores: Latossolos – 311.138 km<sup>2</sup> (27,6%), Neossolos – 310.191 km<sup>2</sup> (27,5%), Argissolos – 169.118 km<sup>2</sup> (15,0%), Luvisolos – 122.809 km<sup>2</sup> (10,9%), Planossolos – 110.719 km<sup>2</sup> (9,8%), Cambissolos – 63.928 km<sup>2</sup> (5,7%), Plintossolos – 13.424 km<sup>2</sup> (1,2%), Chernossolos – 8.509 km<sup>2</sup> (0,8%), Vertissolos – 3.386 (0,3%) e Gleissolos – 3.287 km<sup>2</sup> (0,3%). Os corpos de água correspondem a 9.979 km<sup>2</sup> (0,9%). Portanto, as classes de Latossolos e Neossolos predominam na região do semiárido, visto que envolvem mais de 55% da extensão territorial.

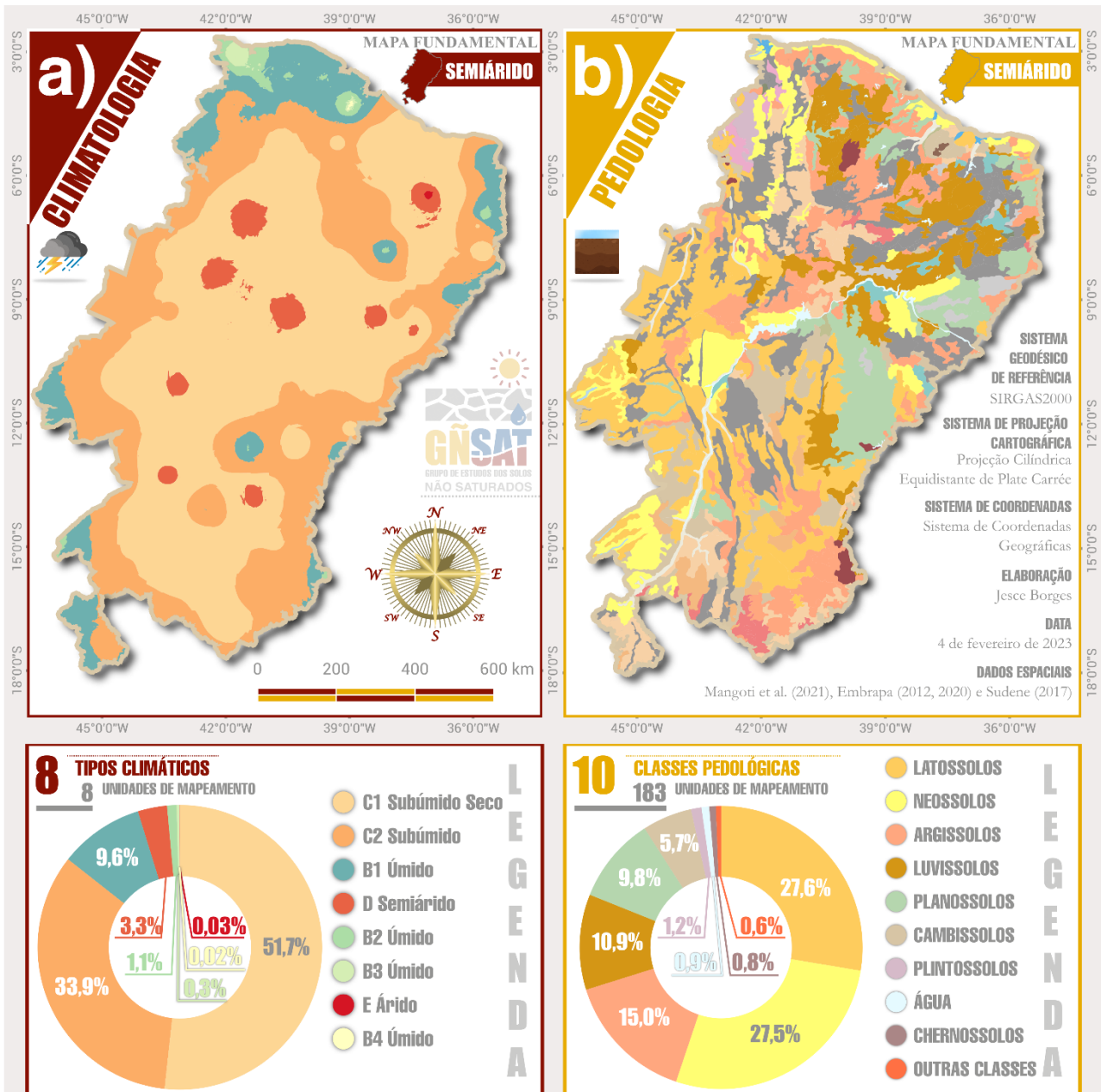


Figura 6. Mapas fundamentais pertinentes aos condicionantes climatológico (a) e pedológico (b). Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

A Figura 7 apresenta a carta interpretativa de suscetibilidade ao colapso dos solos para a região do Semiárido brasileiro segundo o

condicionante climatológico e pedológico. A região do Semiárido brasileiro apresentou área de 569.826 km<sup>2</sup> (50,5%) com suscetibilidade alta,

207.502 km<sup>2</sup> (18,4%) com suscetibilidade média e 340.517 km<sup>2</sup> (30,2) com suscetibilidade baixa. Os

corpos de água equivalem à área de 9.979 km<sup>2</sup> (0,9%).

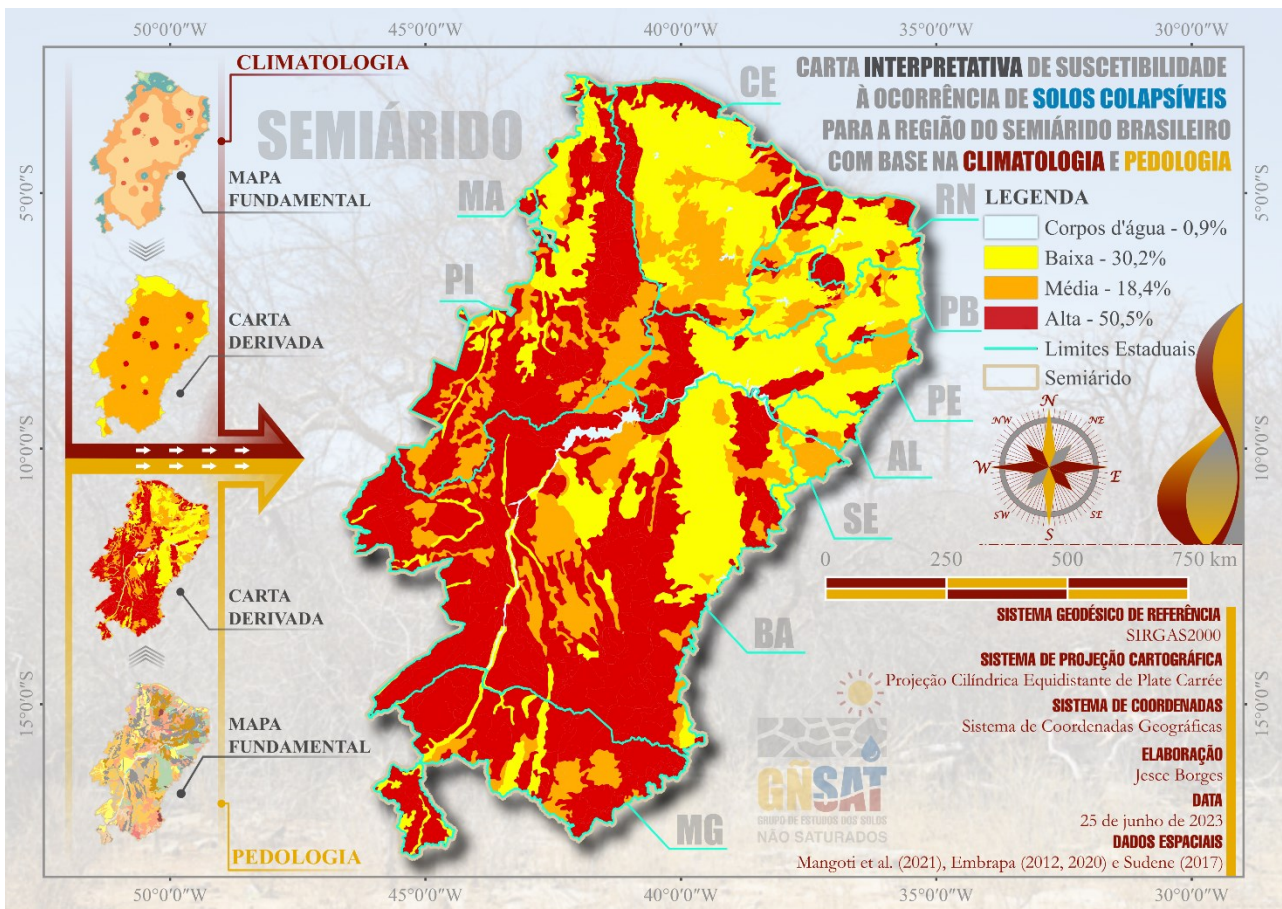


Figura 7. Carta de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis no Semiárido do Brasil: carta interpretativa com base na climatologia e pedologia. Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

Verifica-se que a área de estudo representa significativa parcela do espaço territorial sujeita à ocorrência de solos colapsíveis, sendo possível afirmar que mais de 68,9% do Semiárido é composto por áreas com suscetibilidade alta e média à sua incidência.

A confirmação da metodologia adotada neste estudo está materializada no resultado da sobreposição dos locais de ocorrência de solos colapsíveis sobre a carta interpretativa de suscetibilidade ao colapso. A Figura 8 ilustra que praticamente todos os locais em que foi registrada

a presença de solos colapsíveis estão inseridos nas áreas de suscetibilidade alta e média, sendo 81 e 21 registros, respectivamente. Portanto, a metodologia adotada apresenta 87,1% de acerto.

A Figura 9 mostra a superposição entre os locais dos reservatórios e a carta interpretativa, constatou-se que, dos 411 reservatórios, 61 estão inseridos em área de suscetibilidade alta, 114 em área de suscetibilidade média e 236 em área de suscetibilidade baixa, representando, em termos percentuais, respectivamente, 14,8%, 27,7% e 57,4%.



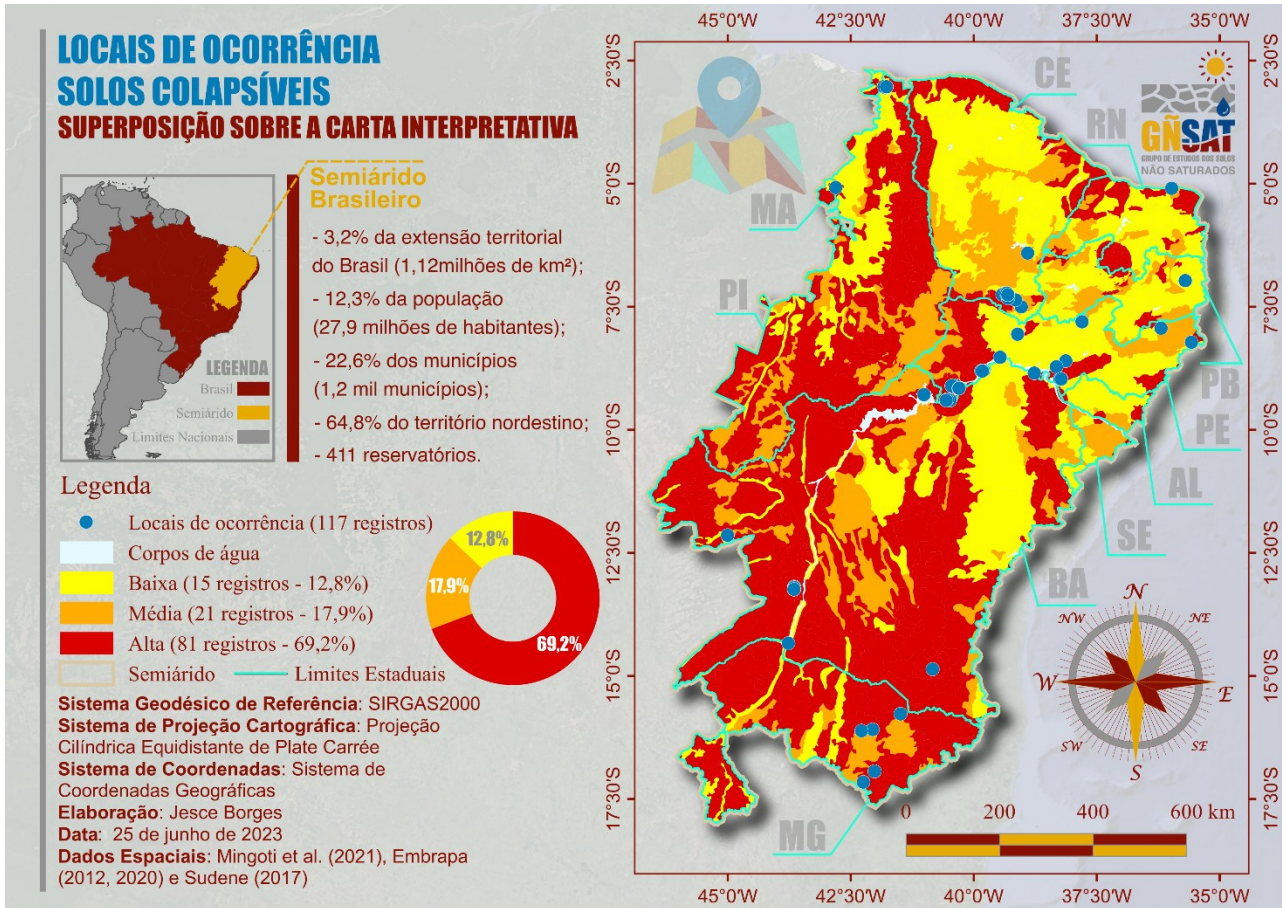


Figura 8. Superposição dos locais de ocorrência sobre a carta. Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

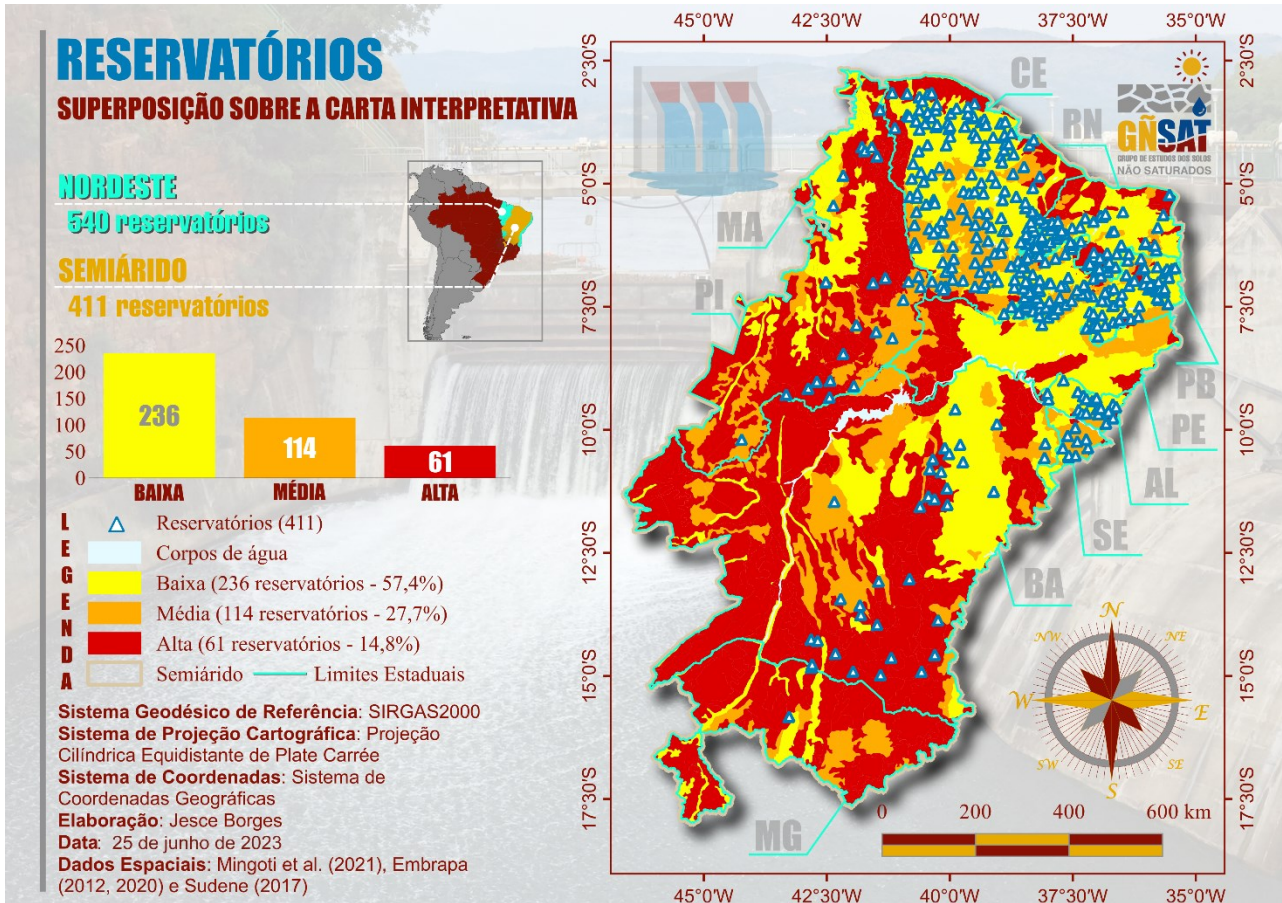

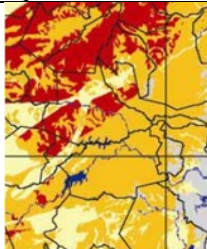
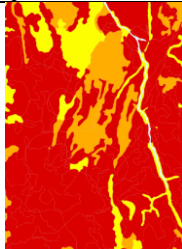


Figura 9. Superposição dos reservatórios sobre a carta. Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

O Quadro 1 apresenta uma análise comparativa envolvendo a carta interpretativa deste estudo com os produtos cartográficos apresentados por Carcedo et al. (1986) na Espanha, e por Amorim (2004) em Pernambuco. No referido quadro, são expostos os seguintes campos: localização, área mapeada, escala, tipo de solo,

metodologia, condicionantes, meio de apresentação, níveis de suscetibilidade adotados, padrão cromático utilizado, isenções de critério, universo testado, particularidades, teoria do conhecimento e detalhe do documento cartográfico.

Quadro 1. Análise comparativa do produto cartográfico desenvolvido neste estudo com outros da literatura. Fonte: Borges, Ferreira & Amorim (2023).

<b>Análise comparativa</b>	<b>Carcedo et al. (1986)</b>	<b>Amorim (2004)</b>	<b>Borges, Ferreira &amp; Amorim (2023)</b>
Local mapeado	Espanha	Pernambuco	Semiárido Brasileiro
Área	505.992 km <sup>2</sup>	98.312 km <sup>2</sup>	1.127.953 km <sup>2</sup>
Escala	1:1.000.000	1:600.000	1:5.000.000
Tipo de solos	Expansivo	Colapsível Expansivo	Colapsível
Método	Método indireto de orientação com avaliação quantitativa, considera o respaldo da opinião de especialistas	Análise de orientação heurística indireta com combinação qualitativa da opinião de especialistas	Análise de orientação heurística indireta com combinação qualitativa da opinião de especialistas
Condicionantes	Geotécnica, Geológica e Climatológica	Pedológica, Geológica e Climatológica	Pedológica e Climatológica
Meio de apresentação	Cartografia em papel e relatório	Cartografia digital em SIG e dissertação	Cartografia digital em SIG, teses de doutorado e artigos
Níveis de suscetibilidade estabelecidos	Alto a muito alto, moderado a alto, baixo a moderado e zero a baixo	Alto, médio e baixo	Alto, médio e baixo
Padrão cromático	Vermelho, laranja, amarelo, verde e branco	Vermelho, laranja e amarelo	Vermelho, laranja, amarelo
Isenções de critérios	Substrato não argiloso de formações superficiais	Áreas onde não correspondeu levantamento de solo com geológico e algumas áreas urbanas	Curso de água, áreas urbanas e campos sem informação
Universo testado	1400 ensaios de expansão e 2000 ensaios de plasticidade	16 locais de pesquisa em solos expansivos e 11 em solos colapsíveis	117 locais de pesquisa em solos colapsíveis
Peculiaridades	O zoneamento não avaliou toda a área mapeada, muitos trechos sem informação foram indicados na cor branca	Nenhuma avaliação de suscetibilidade em apenas 2,1% da área avaliada por diferenças e particularidades das bases utilizadas	Nenhuma avaliação de suscetibilidade foi realizada em 0,9% da área territorial devido aos cursos de água
Teoria do conhecimento	Subjetividade - depende do especialista	Subjetividade - depende do especialista	Subjetividade - depende do especialista
Detalhe			

## Conclusão



A determinação da suscetibilidade, baseada nos condicionantes climatológico e pedológico, forneceu resultados satisfatórios na identificação de ocorrência de solos colapsíveis por meio do uso de Sistema de Informação Geográfica. Contudo, cabe frisar que a avaliação da suscetibilidade ao colapso, por meio da análise da carta interpretativa, não dispensa a realização de investigações em campo e em laboratório.

## Referências

- Agência Nacional de Águas. 2023. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/nordeste-e-semiarido/nordeste-e-semiarido>. Acesso em: 1 de janeiro de 2023.
- Aitchison, G. D. 1973. Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils collapsible, expansible and others. Proceedings 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Russian, ISSMGE. pp. 161-189.
- 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. 2004. Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil. 244p.
- Andrade, R. F. 2005. Mapeamento Geotécnico preliminar em escala de semi-detalhe (1:25.000) da área de expansão urbana de Uberlândia-MG. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 114p.
- Antunes, F.; Campos, T.; Polivanov, H.; Calderano, S.; Andrade, A. 2013. Desenvolvimento de classes e unidades geopedológicas a partir da interação entre a pedologia e a geotecnia. Geotecnia, 127, 61-709. [https://doi.org/10.14195/2184-8394\\_127\\_3](https://doi.org/10.14195/2184-8394_127_3)
- Antunes, F. S.; Salomão, F. X. T. 2018. Solos em pedologia. In: Oliveira, A. M. S.; Monticeli, J. J. Geologia de Engenharia e Ambiental, 1 ed, 2. ABGE: São Paulo. pp. 71-85.
- Aquino, A. E. B. 2020. 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 de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil. 198p.
- 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.
- Araújo, A. G. D.; Caldas, G. P.; Ferreira, S. R. M.; Rolim Neto, C.; Silva Neto, A. N. 2018. Identificação de solos colapsíveis da Região de São Bento do Norte/RN através de ensaios de caracterização e provas de carga em placa. Anais. Anais XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, BA, Brasil, ABMS. pp 1761-1767.
- Ayadat, T.; Hanna, A. 2005. Encapsulated stone columns as a soil improvement technique for collapsible soil. Ground Improvement, 9, 4, 137-147. <https://doi.org/10.1680/grim.2005.9.4.137>
- Ayadat, T.; Hanna, A. 2012. Assessment of soil collapse prediction methods. International Journal of Engineering, 25, 19-26.
- Barbosa, H. T.; Bandeira, A. P. N.; Guilherme, L. C. 2016. Identificação de potenciais de colapso de solos de um trecho da obra do cinturão das águas do Ceará. Anais Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, MG, Brasil, ABMS. 8p.
- Brindeiro, M. G.; Gusmão, A. D.; Maia, G. B.; Souza, R. J. B.; Farias, H. B. 2018. Melhoramento de solo colapsível com técnica DSM (*Deep Soil Mixing*) em um parque eólico na Bahia. Anais XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, BA, Brasil, ABMS. pp 1020-1029.
- Burgos, P. C.; Fonseca, E. C.; Campos, L. E. P. 2010. Estudo de laboratório sobre o colapso de alguns solos da cidade de Barreiras-BA. Anais Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, RS, Brasil, ABMS.
- Campos, G. C.; Santos, F. S. 2019. Colapsibilidade de solos em um distrito de Porto Velho – Rondônia: impactos em habitações populares. Revista IPT, Tecnologia e Inovação, 3, 11, 21-34.



- Carcedo, F. J. A.; Gijón, M. F.; Mazo, C. O.; Rodríguez, J. L. S. 1986. Mapa predictor de riesgos por expansividad de arcillas en España a escala 1: 1.000. 000. Instituto Geológico y Minero de España. 63p.
- Carvalho, M. F. 1994. Estudo de solos colapsíveis no Nordeste do Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil. 160p.
- Chagas, G. S.; Moura, A. S.; Carneiro, A. A. 2019. 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*, 1, 6, 3-19. <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2019.v6i1.2287>
- 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.
- Clemence, S. P.; Finbarr, A. O. 1981. Design Considerations for Collapsible Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 3, 107, 305-317. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001102>
- Custódio, G. S.; Vieira, G. S.; Silva, C. H. C.; Barbosa, P. S. A. 2004. Estudo de fatores que influenciam a curva característica de retenção de água no solo. *Anais 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, São Carlos, SP, ABMS. pp. 223-228.
- Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3, 52-58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- Dudley, J. H. 1970. Review of Collapsing Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96, 925-947. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001426>
- Ferreira, S. R. M. 1988. Solos especiais: colapsíveis, dispersíveis, expansíveis. Relatório Técnico do CNPQ. Recife, Pernambuco, BR. 156p.
- Ferreira, S. R. M. 1995. Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 379p.
- Ferreira, S. R. M. 1999. Mapa de risco a colapsibilidade e expansividade de solos do estado de Pernambuco—Geotecnia Ambiental. Relatório Técnico do CNPQ. Recife, Pernambuco, BR. 100p.
- Ferreira, S. R. M.; Fucale, S. P. 2014. Evaluation of the collapsibility of soils in the semiarid region of Pernambuco, Brazil. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8, 1285-1292.
- Fucale, S. P. 2000. Comportamento de variação de volume devido à inundação em alguns solos colapsíveis do Estado de Pernambuco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil. 138p.
- Gao, C.; Du, G.; Liu, S.; Zhang, D.; Zhang, K.; Zeng, B. 2020. Field study on the treatment of collapsible loess using vibratory probe compaction method. *Engineering Geology*, 274, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105715>
- 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>
- Guilherme, L. C.; Bandeira, A. P. N.; Chaves, A. M. M.; Barbosa, H. T. 2016. Avaliação do potencial de colapso de um solo do município de Barbalha-CE. *Anais XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Belo Horizonte, MG, Brasil, ABMS. 6p.
- 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>
- Houston, S. L.; Houston, W. N.; Zapata, C. E.; Lawrence, C. 2001. Geotechnical engineering practice for collapsible soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19, 333-355. <https://doi.org/10.1023/A:1013178226615>
- Jefferson, I.; Rogers, C.; Evstatiev, D.; Karastanev, D. 2005. Treatment of metastable loess soils: Lessons from Eastern Europe. *Elsevier Geo-Engineering 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)
- Jennings, J. E.; Knigh, K. 1975. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to “collapse” of grain structure. *Proceedings Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Durban, Balkema. pp. 99-105.
- 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))
- Leão, H. C. R. S. 2019. PIB do Nordeste cresce acima da média Nacional. Banco do Nordeste do Brasil, Diário Econômico ETENE, 117, 1-2.
- Li, P.; Vanapalli, S.; Li, T. 2016. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2, 8, 256-274.  
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.002>
- Lollo, J. A. 2012. Revisão dos métodos de cartografia geotécnica de materiais geológicos colapsíveis. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 2, 1, 99-115.
- Mahmood, M. S.; Abraham, M. J. 2021. A Review of Collapsible Soils Behavior and Prediction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1094, 012044.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012044>
- Margoto, L. O.; Aparecido Júnior, L. G. 2016. Caracterização e análise de solos colapsíveis na área urbana do município de Campos Gerais. *Anais IV Jornada Científica da Geografia*. Alfenas, Minas Gerais, MG, Brasil, UNIFAL. pp. 192-195.
- 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.
- Martinez, G. S. S. 2003. Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. 290p.
- Medeiros, S. S.; Lima, R. C. C.; Lima, J. P.; Nunes, T. H. C. 2017. Monitoramento dos Reservatórios da Região Semiárida. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, Paraíba, Brasil, BR.
- Mendonça, M. B. 1990. Comportamento de solos colapsíveis da região de Bom Jesus da Lapa – Bahia. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 281p.
- Mendonça Neto, H. C. 2011. Análise de volume devido à inundação de um solo colapsível utilizado em um canal de irrigação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil. 134p.
- Mendonça Neto, H. C.; Ferreira, S. R. M. 2015. Behavior of volume change due to wetting in a collapsible soil to used in irrigation channel. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*, 2, 770-778.
- Menezes, Y. R.; Bahiano Filho, R. S.; Viana, H. M. F. 2018. Avaliação do comportamento do solo do campo experimental da FTC de Vitória da Conquista - BA frente às variações de umidade. *Anais XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Salvador, BA, Brasil, ABMS. 8p.
- Moniz, A.C. 1973. *Elementos de Pedologia*. USP, São Paulo, 459p.
- Opukumo, A. W.; Davie, C. T.; Glendinning, S.; Oborie, E. 2022. A review of the identification methods and types of collapsible soils. *Journal of Engineering and Applied Science*, 1, 69, 1-21.  
<https://doi.org/10.1186/s44147-021-00064-2>
- Popescu, M. E. 1986. A comparison between the behaviour of swelling and of collapsing soils. *Engineering Geology*, 23, 145-163.  
[https://doi.org/10.1016/0013-7952\(86\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(86)90036-0)
- Rafie, B. M. A.; Moayed, R. Z.; Esmaeli, M. 2008. Evaluation of soil collapsibility potential: A case study of Semnan railway station. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13, 1-7.
- Reginato, A. R.; Ferrero, J. C. 1973. Collapse potential of soils and soil-water chemistry. *Proceedings International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Moscow, Russian, Pergamon. pp. 177-183.
- Riani, H. C.; Barbosa, M. C. 1989. Collapsible sand and its treatment by compaction. *Proceedings International conference on SMFE*, Rio de Janeiro, Brazil, CIMSTF. pp. 643-646.
- Rodrigues, R. A.; Vilar, O. M. 2013. Colapso de solo desencadeado pela elevação do nível d'água. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, 1, 6, 13-27.  
<https://doi.org/10.17271/23188472162013521>
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T. Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araujo Filho, J. C.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Embrapa, 5 ed., 356p.
- Silva, J. R.; Mota, F. C. M. 2020. A dinâmica econômica do Semiárido brasileiro e suas transformações recentes. *Anais XXVIII Congresso (virtual) de Iniciação Científica da*

- UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil, UNICAMP, pp. 1-5.
- Silva, L. F. 2022. Solos colapsíveis no semiárido brasileiro: uma visão panorâmica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil. 184p.
- Silva, M. J. R. 2003. Comportamento geomecânico de solos colapsíveis e expansivos em Petrolina-PE: cartas de suscetibilidade. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil. 110p.
- Silva, T. B.; Bello, M. I. M. C. V.; Ferreira, S. R. M. 2020. Correlações das classes pedológicas com características geotécnicas aplicadas ao uso e ocupação do solo. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 3, 5, 346-358. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.3327>. 346-358
- 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>
- Sun, P. P.; Zhang, M. S.; Zhu, L. F.; Xue, Q.; Hu, W. 2013. Typical case study of loess collapse and discussion on related problems. *Geological Bulletin of China*, 32, 847-851.
- Tang, C. S.; Zhu, C.; Cheng, Q.; Zeng, H.; Xu, J. J.; Tian, B. G.; Shi, B. 2021. Desiccation cracking of soils: a review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors. *Earth-Science Reviews*, 216, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103586>
- Thorntwaite, C. W.; Mather, J. R. 1955. *The Water Balance*. Drexel Institute of Technology, New Jersey, 104p.
- Vasconcelos, R. P. R. 2001. Mapas de suscetibilidade de solos colapsíveis e expansivos do Estado de Pernambuco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 93p.
- Vilar, O. M.; Ferreira, S. R. M. 2015. Solos colapsíveis e expansivos. In: Carvalho, J. C.; Gitirana Junior, G. F. N.; Machado, S. L.; Mascarenha, M. M. A.; Silva Filho, F. C. [eds.]. *Solos não saturados no contexto geotécnico*, 1 ed., ABM, São Paulo. pp. 415-440.
- Wang, C.; Zhang, Z. U.; Qi, W.; Fan, S. M. 2018. Morphological approach to quantifying soil cracks: application to dynamic crack patterns during wetting-drying cycles. *Soil Science Society of America Journal*, 82, 757-771. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0088>
- Wolle, C. M.; Benvenuto, C.; Carvalho, P. A. 1981. Collapsible soil foundation of canals in central Brazil. *Proceedings International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, ICSMFE. pp. 277-280.
- Xavier, J. M. 2018. Estudo do comportamento geotécnico de um solo colapsível voltado para fundações superficiais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 175p.
- Zaine, J. E. 2000. Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP). Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo, Brasil. 149p.
- 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>
- Zimbardo, 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>