



SOLOS EXPANSIVOS: CARTA DE SUSCETIBILIDADE DE OCORRÊNCIA NO BRASIL UTILIZANDO REDE NEURAL ARTIFICIAL - RNA

Jesce John Silva Borges¹ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7055-3490>
Maria Julia de Oliveira Holanda² - Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7503-0296>
Silvio Romero de Melo Ferreira³ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5760-1494>
Samuel França Amorim⁴ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9920-7030>

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil *

² Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil **

³ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil ***

⁴ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil ****

Artigo recebido em 18/05/2023 e aceito em 27/08/2023

RESUMO

Os solos expansivos causam sérios problemas quando utilizados na prática da engenharia relacionados à variação de volume e perda de resistência devido à mudança de umidade, causando patologias nas edificações. A identificação desses solos é uma importante etapa para a orientação do planejamento do uso e ocupação. Este artigo visa apresentar a carta de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos no Brasil desenvolvida a partir de Rede Neural Artificial (RNA) treinada com um banco de dados de solos expansivos identificados por caracterização geotécnica com 526 registros utilizando três variáveis condicionantes de entrada: classificação pedológica, unidades geológicas e condicionantes climatológicos. A identificação desses solos tem acurácia de 89,70% e precisão de 90,70%. O desempenho é enquadrado no nível de excelência. O produto cartográfico apontou suscetibilidade alta em 35,9%, média em 9,8%, baixa em 3,7%, classificação ausente em 48,0% e inconclusivo em 2,6% da extensão territorial. A carta de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos do Brasil elaborada tem uma forte aderência aos casos reais de ocorrência de solos expansivos, permitindo identificar previamente os locais críticos do território brasileiro no que tange ao comportamento expansivo, auxiliando no uso e ocupação do solo.

Palavras-chave: solos expansivos; Redes Neurais Artificiais; classificação; Cartografia.

* Doutorando do programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, E-mail: jesce.john@ufpe.br

** Doutora do programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, E-mail: mariajulia.holanda@ufpe.br

*** Professor Doutor do programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, E-mail: silvio.mferreira@ufpe.br

**** Professor Doutor do programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, E-mail: samuel.famorim@ufpe.br

EXPANSIVE SOILS: OCCURRENCE SUSCEPTIBILITY MAP FOR BRAZIL USING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK - ANN

ABSTRACT

Expansive soils can cause serious problems in engineering practice because of volume variation and loss of strength due to changes in water content bringing difficulties in the management of agricultural practices, agriculture and causing buildings pathologies. The identification of these soils is important to be properly guide use and occupation planning. This paper aims to present a susceptibility map for expansive soils in Brazil, developed from an Artificial Neural Network (ANN) trained with a database of expansive soils identified by geotechnical characteristics containing 526 records, using three input conditioning variables: pedological classification, geological unit, and climatic conditions. These soils were identified at an accuracy of 89.70% and a precision of 90.70%. This performance is categorized as excellent. The cartographic product indicated high susceptibility for 35.9% of the territorial extension, medium susceptibility for 9.8%, and low for 3.7%, with classification absent for 48% and inconclusive for 2.6%. The susceptibility map of the occurrence of expansive soils of Brazil strongly adheres to the actual occurrence of expansive soils, allowing for prior identification of critical locations in Brazil, assisting in land use and occupation.

Keywords: expansive soils; Artificial Neural Networks; classification; Cartography.

SUELOS EXPANSIVOS: CARTA DE SUSCEPTIBILIDAD DE OCURRENCIA EN BRASIL UTILIZANDO RED NEURONAL ARTIFICIAL - RNA

RESUMEN

Los suelos expansivos causan graves problemas cuando se utilizan en la práctica de la ingeniería, relacionados con la variación de volumen y la pérdida de resistencia debido a cambios en la humedad, lo que provoca patologías en las edificaciones. La identificación de estos suelos es una etapa importante para orientar la planificación del uso y ocupación del suelo. Este artículo tiene como objetivo presentar el mapa de susceptibilidad de suelos expansivos en Brasil, desarrollado a partir de una Red Neuronal Artificial (RNA) entrenada con una base de datos de suelos expansivos identificados mediante caracterización geotécnica, con 526 registros y utilizando tres variables condicionantes de entrada: clasificación pedológica, unidades geológicas y condiciones climáticas. La identificación de estos suelos tiene una precisión del 89,70% y una exactitud del 90,70%. El rendimiento se clasifica como excelente. El producto cartográfico muestra una susceptibilidad alta en el 35,9% del territorio, media en el 9,8%, baja en el 3,7%, clasificación ausente en el 48,0% e inconclusiva en el 2,6%. El mapa de susceptibilidad de suelos expansivos en Brasil elaborado tiene una fuerte correlación con los casos reales de suelos expansivos, lo que permite identificar previamente las áreas críticas del territorio brasileño en cuanto a su comportamiento expansivo, ayudando en el uso y ocupación del suelo.

Palabras clave: suelos xpansivos; Redes Neuronales Artificiales; clasificación; Cartografía.

INTRODUÇÃO

A instabilidade volumétrica (contração e expansão) de solos expansivos devido à mudança no teor de água é complexa e influenciada por vários fatores, entre os quais se incluem a origem e formação dos solos, o tipo de solo ou classe, condicionantes climáticos e estados de tensão em que se encontra e do que será submetido. Dois requisitos são necessários para que um solo possa exibir expansividade, um intrínseco e outro extrínseco (CHEN, 1988).

O primeiro é inerente ao próprio solo, a sua origem, à formação mineralógica, à textura, à estrutura, ao perfil estratigráfico, à espessura do solo, à descontinuidade litológica, dentre outros. Isso estabelece a capacidade expansiva teórica. O segundo está relacionado com fatores externos, como clima, disponibilidade hídrica, biota e atuação antrópica - manejo, uso e ocupação que determinam se o potencial expansivo se apresenta ou não (CORRÊA et al., 2003; FERREIRA e FERREIRA, 2009; SOARES e MAGALHÃES, 2021).

A presença de solos expansivos no manejo das práticas agrícolas e da agropecuária traz dificuldades. O solo em período chuvoso tornar-se plástico, pegajoso e aumenta de volume devido à entrada da água entre as unidades estruturais dos argilominerais do tipo 2:1, causando adensamento pelo pisoteio dos animais, se for pasto ou pelas máquinas, além de formação de micro relevo (FLORES et al., 2007; COLLARES et al., 2008; MORAES et al., 2011). No período seco, o solo contrai, a consistência é dura, há formação de aglomerados internos, a falta ou morte de cobertura vegetal expõem mais o solo ao ressecamento ocasionando fendilamentos na superfície.

No período chuvoso, o aumento da umidade do solo reduz a sua rigidez do solo, aumenta a compressibilidade e reduz a resistência ao cisalhamento. No período seco prolongado, a presença de fendas de dessecação aumenta a capacidade de infiltração, modifica o perfil de umidade do perfil do solo em maior profundidade e no próximo período chuvoso pode afetar o desempenho de elementos estruturais de casas, edifícios, reservatórios, pavimentos, aterros e taludes além de aumentar sua suscetibilidade à erosão (YESILLER et al., 2000; RODRÍGUEZ, et al., 2007; HARIANTO et al., 2008; PERON et al., 2009; TANG et al., 2011, 2016; KODIKARA e COSTA, 2013; GHAZIZADE e SAFARI, 2017).

Na construção civil em obras de engenharia, como canais de irrigação e agrovilas, a mudança de sucção no solo, aumento no período seco ou diminuição no período chuvoso, causam fissuras, trincas e rachaduras nas obras, podendo levar a ruptura. Em todos os casos, a mudança da umidade

do solo é inevitável (AL-RAWAS e GOOSEN, 2006; AL-MUKHTAR; KHATTAB; ALCOVER, 2012; LIU; BUZZI; VAUNAT, 2014; LIM e SIEMENS, 2016; YUAN et al., 2016).

Solos potencialmente expansivos têm sido identificados em todos os continentes. As características predominantes dos solos expansivos são: solos não saturados; com minerais argílicos, montmorilonita ou vermiculita e mica; contrações e expansões com aparecimento de superfícies de fricção; com drenagem baixa e atividade alta; derivados de rochas ígneas, basicamente, basalto, diabásios e gabros e de rochas sedimentares basicamente (folhelhos, margas e calcários) e solos em regiões onde a evapotranspiração excede a precipitação, regiões semiáridas de clima tropical e temperado (VILAR e FERREIRA, 2015).

Schreiner (1987) registra a presença de solos expansivos nas regiões de Angola, Etiópia, Gana, Quênia, Nigéria, África do Sul, Tanzânia, Zíbia, Canadá, Argentina, Peru, Venezuela, Estados Unidos, Austrália, China, Índia, Romênia, Espanha, Reino Unido, Israel, Jordânia e Arábia Saudita. Ocorrências no Chile, Cuba, Brasil, Marrocos, México, Turquia, grandes áreas da Índia e Oriente Médio são citadas por Chen (1988); Ferreira (1995); Vargas et al. (1989); Bowles (1988); Al-Rawas e Goosen (2006) e Elkady; Al-Mahbashi; Al-Shamrani (2015).

No Brasil, os solos expansivos são encontrados em solos residuais ou colúviais derivados de rochas sedimentares intemperizadas. Vargas (1985) e Vargas et al. (1989) identificaram quatro áreas principais do território brasileiro: i) ao longo da costa nordeste, manchas de vertissolos aparecem em formações sedimentares cretáceas ou terciárias, aproximadamente ao longo do meridiano da Bahia para o norte, até atravessar Pernambuco e Ceará. Costa Nunes; Vasconcelos; Pandolfi (1982) destacaram solos expansivos na área do grande Recife, da Formação Maria Farinha do Grupo Barreiras e de rochas extrusivas básicas. Ferreira (1988) encontrou solos expansivos em vários municípios de Pernambuco. Gusmão Filho e Silva (1991), Jucá; Gusmão Filho; Justino (1992), Ferreira e Ferreira (2009), Paiva et al. (2016) e Ferreira et al. (2020) encontraram argila expansiva na Região Metropolitana do Recife.

Na zona nordestina de clima constante e seco, onde as precipitações anuais caem até 500 mm e menos de 500 mm no mês seco, os solos expansivos foram encontrados no Massapê do Recôncavo Baiano (SOBRAL, 1956; SIMÕES e COSTA FILHO, 1981; PRESA, 1986). Nas regiões Centro-Sul e Sul, esses solos foram encontrados em camadas superficiais de podzólicos das Formações Passa Dois e Grupo Tubarão, nos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina em uma zona subtropical de verões quentes e úmidos contrastantes a invernos frios e secos, com precipitação anual de cerca de

2.000 mm. No sul do estado do Rio Grande do Sul, registrou-se ocorrência desses solos em sedimentos carboníferos ou cretáceos, na Formação Santa Maria, como em áreas com clima úmido constante e precipitação pluviométrica anual em torno de 2.000 mm, ou acima de 50 mm no mês seco.

A identificação de solos expansivos é um estágio essencial no sucesso de projetos de uso e ocupação do solo. Falhas nessa etapa podem levar à ruptura de obras ou à necessidade de intervenções caras. Índices tradicionais utilizados para caracterização dos solos, como a granulometria, índices de consistência, não conseguem identificar com exatidão se um solo é expansivo. Métodos de previsão de mudanças de volume em solos expansivos podem ser agrupados em diretos e indiretos (Quadro 1).

Quadro 1 - Métodos de identificação dos solos expansivos.

Métodos	Subdivisões	Base para definição do critério
Indireto	Identificativos	Microscopia eletrônica de varredura
	Orientativos	Pedologia, Geologia e Climatologia
		Ensaio expedito
	Qualitativos	Índices físicos
		Ensaio de campo – cone
		Sondagem a percussão com torque
Direto	Avaliativos	Ensaio edométrico simples, duplos e de sucção controlada
	Quantitativos	Ensaio de campo como cone e o expansocolapsômetro

Fonte: Autores (2023).

Não há um método que julgue ser universalmente representativo, entretanto, uma clara distinção pode ser feita entre solos de expansividade intrínseca, potencial de expansão e potencial de inchamento em uma superfície ou em profundidade (SCHREINER, 1987; FERREIRA, 1995). Uma argila montmorilonítica pura pode ter uma alta expansividade intrínseca, mas ter potencial de expansão nulo se já estiver saturada. Isso pode diferir, em campo, daqueles usados na estimativa do potencial de expansão por métodos empíricos e de laboratório.

Métodos indiretos recorrem à identificação mineralógica, índices físicos, limites de consistência ou índices ligados à textura, composição e comportamento do solo. Os métodos diretos são aqueles baseados na medida de expansão induzida ao solo ou da tensão necessária para impedi-lo, realizando-se mediante ensaios do tipo edométrico e com o expansocolapsômetro. Existem ainda

critérios que associam tanto métodos diretos quanto indiretos, reunindo informações qualitativas a respeito da expansividade do solo a partir dos ensaios de caracterização, característica de um método indireto, e informações quantitativas a respeito do grau de expansividade a partir de ensaios edométricos, típico de um método direto.

Carcedo et. al. (1986) elaboraram um mapa de previsão de risco a expansividade de argilas na Espanha, na escala de 1:1.000.000, classificando a suscetibilidade em quatro categorias: muito baixa, baixa a moderada, moderada a alta e de alta a muito alta, considerando características litológicas, climatológicas e geotécnicas. Pereira (1999) elaborou uma carta de predisposição à ocorrência de problemas expansivos, para solos localizados a noroeste da Região Metropolitana de Curitiba/PR, utilizando tensões de expansão e expansão livre.

No âmbito do estado de Pernambuco, foram elaborados produtos cartográficos a partir de levantamentos climatológicos, pedológicos e geológicos. Baseado na metodologia desenvolvida por Ferreira (1999), diversos autores (VASCONCELOS, 2001; SILVA, 2003; AQUINO, 2020) produziram cartas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos, classificando as unidades de mapeamento em três níveis de suscetibilidade: baixo, médio e alto. Amorim (2004) apresentou o Sistema de Informações Geográficas dos Solos Expansivos e Colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE). O resultado do trabalho apontou suscetibilidade de ocorrência alta em 12,5% da área do Estado, média em 38,7% e baixa em 45,2%.

Aquino e Ferreira (2022) elaboraram cartas interpretativas de suscetibilidade à ocorrência de solos colapsíveis e expansivos de Teresina/PI, por meio de levantamentos climatológicos, geológicos e pedológicos. Tavares et al. (2022) elaboraram cartas de suscetibilidade à expansão e ao colapso dos solos do estado do Ceará, a partir de características das classes pedológicas, classificando-as nos níveis de suscetibilidade baixa, média e alta. Similarmente, Santos et al. (2022) apresentaram produtos cartográficos obtidos de mapas derivados da pedologia, classificando os solos de Sergipe quanto à suscetibilidade ao colapso e à expansão.

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são poderosos mecanismos computacionais que se baseiam no aprendizado neural biológico. Através da análise de um conjunto de dados, elas são capazes de realizar previsões, classificações, reconhecimento de padrões e aproximações de funções com grande eficácia (PESSOA et al., 2021).

Basma; Barakat; Omar (2003), Moosavi; Yazdanpanah; Doostmohammadi (2006), Doris; Rizzo; Dewoolkar (2008), Ashayeri e Yasrebi (2008), Ikizler et al. (2010) e Merouane e Mamoune

(2018) desenvolveram RNA para capturar tendências no movimento vertical da superfície do solo e prever a porcentagem de expansão livre e a tensão de expansão do solo. Ao comparar a relação entre os valores de tensões medidos e os valores obtidos pela RNA, todas essas pesquisas obtiveram um índice de correlação acima de 90% na previsão. Goutham e Krishnaiah (2021) afirmam que as redes neurais são indicadas para prever a natureza complexa do solo expansivo, uma vez que tem demonstrado um potencial preditivo superior em relação às abordagens convencionais.

O presente artigo tem como objetivo elaborar uma carta de suscetibilidade de ocorrência de solos potencialmente expansivos no Brasil utilizando Rede Neural Artificial (RNA) treinadas com solos expansivos identificados por caracterização geotécnica considerando como variáveis de entrada a classificação pedológica, geológica e climática dando como saída a probabilidade de pertencer à classe de solos expansivos. Este artigo ajudará as comunidades científicas de ciência dos solos e engenharia geotécnica na identificação de solos potencialmente expansivos e no planejamento do uso e ocupação do solo assim como no desenvolvimento e na conservação do meio ambiente.

METODOLOGIA

O Banco de Dados de Solos Especiais - BANDASE do Grupo de Pesquisa de Solos Não-Saturados (GÑsat) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), iniciado na década de 90 por Ferreira (1990), vem sendo atualizado periodicamente a partir de pesquisas nas bases de dados, bancos de teses, dissertações e anais de congressos nacionais e internacionais, e conta com amostras georreferenciadas com dados da publicação, no qual se destacam a caracterização do solo, plasticidade e potenciais de expansão e colapso por métodos indiretos e diretos.

A referida pesquisa foi realizada em diversos portais de publicações científicas e acadêmicas, tais como: ResearchGate, SciELO, Google Acadêmico, Oasisbr, Scopus, Periódicos CAPES/MEC, biblioteca virtual da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia (ABMS), ZoteroBib, Sistema Integrado de Bibliotecas da UFPE e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD). Identificados os trabalhos pertinentes aos solos colapsíveis e expansivos, os dados dessas publicações foram registrados no BANDASE.

Com o avanço das pesquisas do GÑsat, esse banco de dados passa a contar com 526 amostras de solos expansivos e colapsíveis das 5 regiões do Brasil (Figura 2), sendo 259 amostras de solos expansivos e 267 de solos colapsíveis. As amostras foram distribuídas para compor às três etapas de

desenvolvimento da rede: 237 (60,3%) amostras para o treinamento, 78 (19,8%) para seleção e 78 (19,8%) para teste. As demais (133 amostras) foram destinadas à validação às cegas. Existe uma maior concentração de amostras nas regiões do Nordeste e Sudeste, onde ocorrem uma maior quantidade de pesquisas em universidades sobre as características desses solos (Figura 1).

Figura 1 - Registros de ocorrências de solos expansivos segundo o BANDASE.



Fonte: Autores (2023).

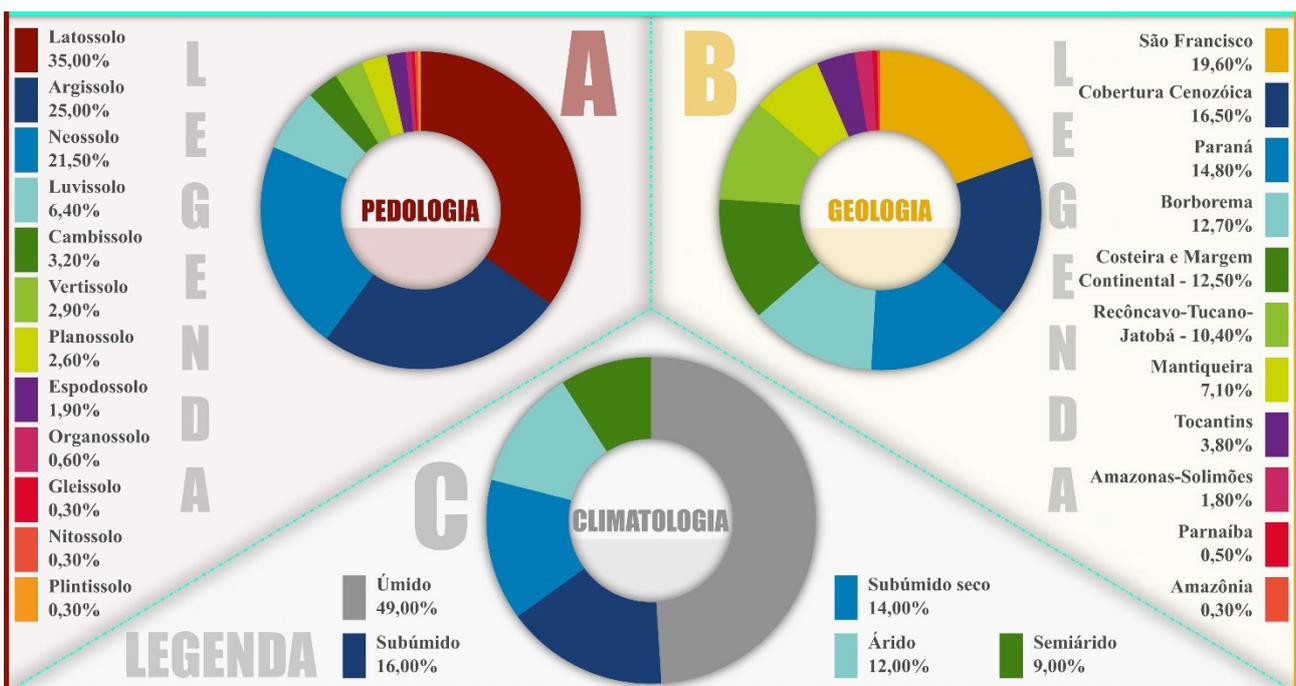
As variáveis qualitativas utilizadas na elaboração RNA estão relacionadas as classes pedológicas, unidades geológicas e classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955) e foram baseadas na metodologia de Amorim (2004) a qual apresentou os três condicionantes do meio físico como os mais representativos para o zoneamento geotécnico dos solos expansivos e colapsíveis do estado de Pernambuco. A utilização, para fins científicos, de dados relacionados ao meio físico pressupõe que seja conhecida a localização espacial exata de onde foram extraídas as amostras, ou seja, suas coordenadas geográficas.

Na classificação pedológica, foram adotadas as classes do 1º nível categórico (ordem), numa escala de 1:250.000 (IBGE, 2019a). Quanto à classificação geológica, adotaram-se as unidades litoestratigráficas de mapeamento na escala de 1:250.000, (IBGE, 2019b). Por fim, na classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955), foram utilizados os índices de umidade classificados em 9 categorias, numa escala que vai do árido ao superúmido. Esse mapa fundamental foi elaborado

pelos profissionais da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e apresenta escala de 1:1.000.000 (MINGOTI et al., 2021).

Como as variáveis de entrada dessa rede são integralmente categóricas, nenhuma média e desvio padrão são apresentados para elas. Entretanto, é possível observar as características de pedologia, geologia e clima que se repetem com o menor e maior frequência nas amostras (HOLANDA, 2022). O detalhamento da distribuição dessas variáveis é representado pela Figura 2.

Figura 2 – Caracterização da amostra referente à Rede BR03, segundo as variáveis categóricas. Pedologia (a), Geologia (b) e Climatologia (c).



Fonte: Autores (2023).

O algoritmo do programa utilizado para a formação dos grupos de dados de entrada extrai automaticamente combinações no conjunto de dados que oferecem a melhor generalização. Isso é feito por meio de um subconjunto de entradas que minimiza o erro de seleção, utilizando o método estocástico do algoritmo genético. Após definir as três variáveis de entrada e os grupos de treinamento, seleção e teste, apresenta-se a melhor arquitetura que define a rede. Por fim, verifica-se o resultado dos testes de desempenho por meio da análise da matriz de confusão e de parâmetros derivados, do gráfico ROC e do gráfico de ganho acumulado.

As redes neurais artificiais são capazes de lidar com casos de amostras que apresentam registros de entrada ausentes por algum motivo. Essas entradas são comuns em bancos de dados construídos a partir de diversas fontes e são representadas por símbolos no conjunto de dados, como "NA" (não disponível), "NaN" (não é um número), "Desconhecido" ou "?". Optou-se por não utilizar valores numéricos, como zero, para representar a ausência de informações, a fim de evitar confusões entre informações ausentes e valores genuinamente nulos.

A rede neural aplicada aos solos expansivos foi desenvolvida utilizando o Neural Designer (4.2.0), uma plataforma de análise de dados que possibilita a criação, treinamento e implantação de modelos de redes neurais. O processo envolveu três etapas principais: treinamento (aprendizagem), seleção (definição da arquitetura da rede) e testes (comparação das saídas da rede neural em um conjunto de variáveis independentes). Essa comparação foi realizada utilizando a Matriz de Confusão e suas métricas de avaliação binária, a área sob a curva ROC e o percentual de ganho acumulado na identificação de amostras expansivas.

A arquitetura que melhor representa as variáveis de entrada, a quantidade de camadas ocultas e o número de neurônios em cada camada, é constituída por 3 entradas, 2 camadas ocultas contendo 4 neurônios e 1 neurônio de saída. A função Logística foi aplicada como a função de ativação das duas camadas ocultas, apresentando resultados de 0 para solo 'não expansivo' e 1 para solo 'expansivo'. O valor de 0,5 representa o limiar para decisão. Na Figura 3, tem-se uma representação da arquitetura de rede, que com maior variação as características qualitativas, para cada variável de entrada, apresentou 30 entradas.

Figura 3 - Representação da melhor arquitetura da rede neural.



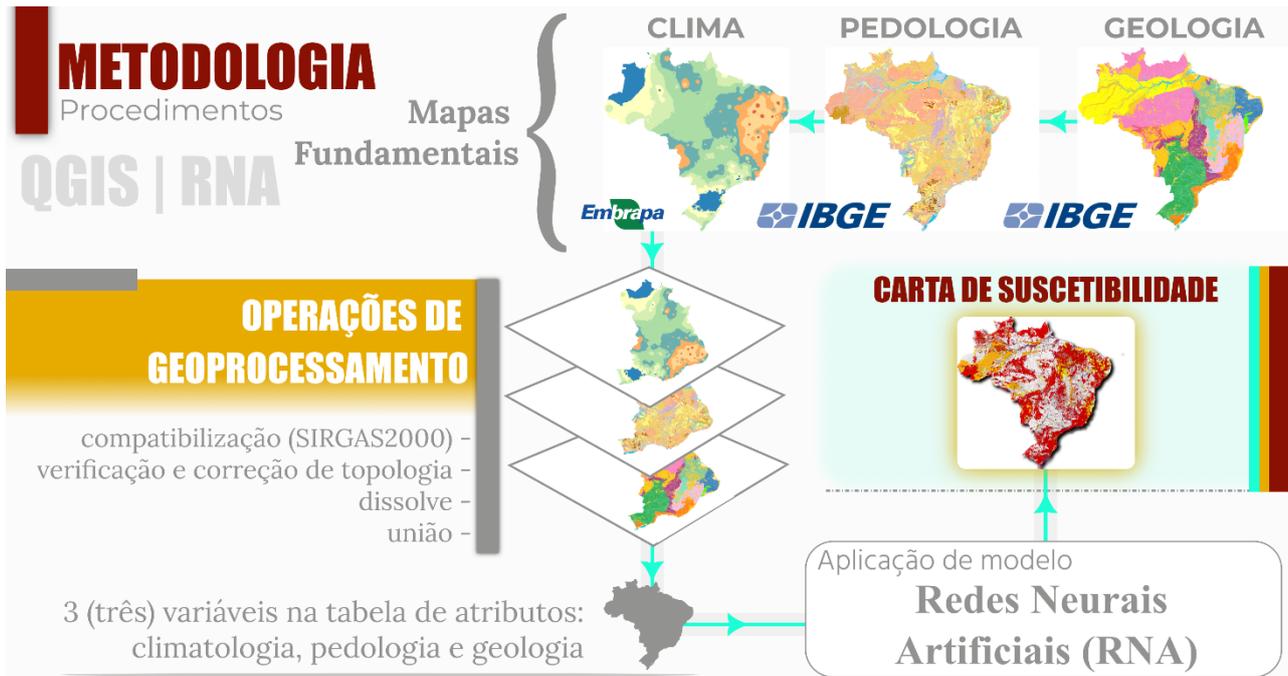
Fonte: Autores (2023).

A partir da equação resultante da rede neural desenvolvida foi possível elaborar um produto cartográfico referente à classificação de suscetibilidade de ocorrência do solo expansivo. As amostras de solos que estiveram localizadas em áreas com característica geológica identificada como ‘corpo d’água’ ou característica pedológica identificada como ‘corpo d’água’ ou ‘outros’, não prosseguiram com a classificação, tendo em vista a incerteza desses atributos às propriedades do solo.

Após a construção do melhor modelo de predição, foi aplicada a classificação pelo software para toda a área de estudo visando gerar a carta de suscetibilidade à expansão para o território do Brasil utilizando QGIS. O modelo gerado permite expandir a classificação binária da suscetibilidade à expansão (classificada em apenas 0 e 1) e a visibilidade em probabilidades de ocorrência (variando entre 0 e 1 ou 0 a 100%). O produto cartográfico foi expresso quanto ao índice de expansão em termos de probabilidade de ocorrência, divididos em três graus de suscetibilidade: alta (de 1,00 a 0,80), média (de 0,80 a 0,70) e baixa (de 0,70 a 0,50).

A Figura 4 mostra o processo de elaboração da Carta de Suscetibilidade. As áreas que não apresentam suscetibilidade à expansão foram denominadas como ausentes. Os corpos de água, as áreas urbanas e os campos da tabela de atributos com ausência de informação foram áreas nomeados como inconclusivo.

Figura 4 - Processo de elaboração da Carta de Suscetibilidade.



Fonte: Autores (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As métricas de performance foram aplicadas para avaliar o desempenho tanto do modelo de teste quanto de validação. Esses resultados são mostrados na Tabela 1 que apresenta as taxas de VP (Verdadeiras Expansivas), VN (Verdadeiras Não-Expansivas), FP (Falsas Expansivas), FN (Falsas Não-Expansivas), Acurácia e Precisão. Todas as métricas resultantes apontam para modelo com bom desempenho, visto que, para as métricas de acurácia e precisão, quanto mais próximos de 1, mais corretas as instâncias foram classificadas.

Tabela 1 - Métricas de desempenho para os dados de teste e validação.

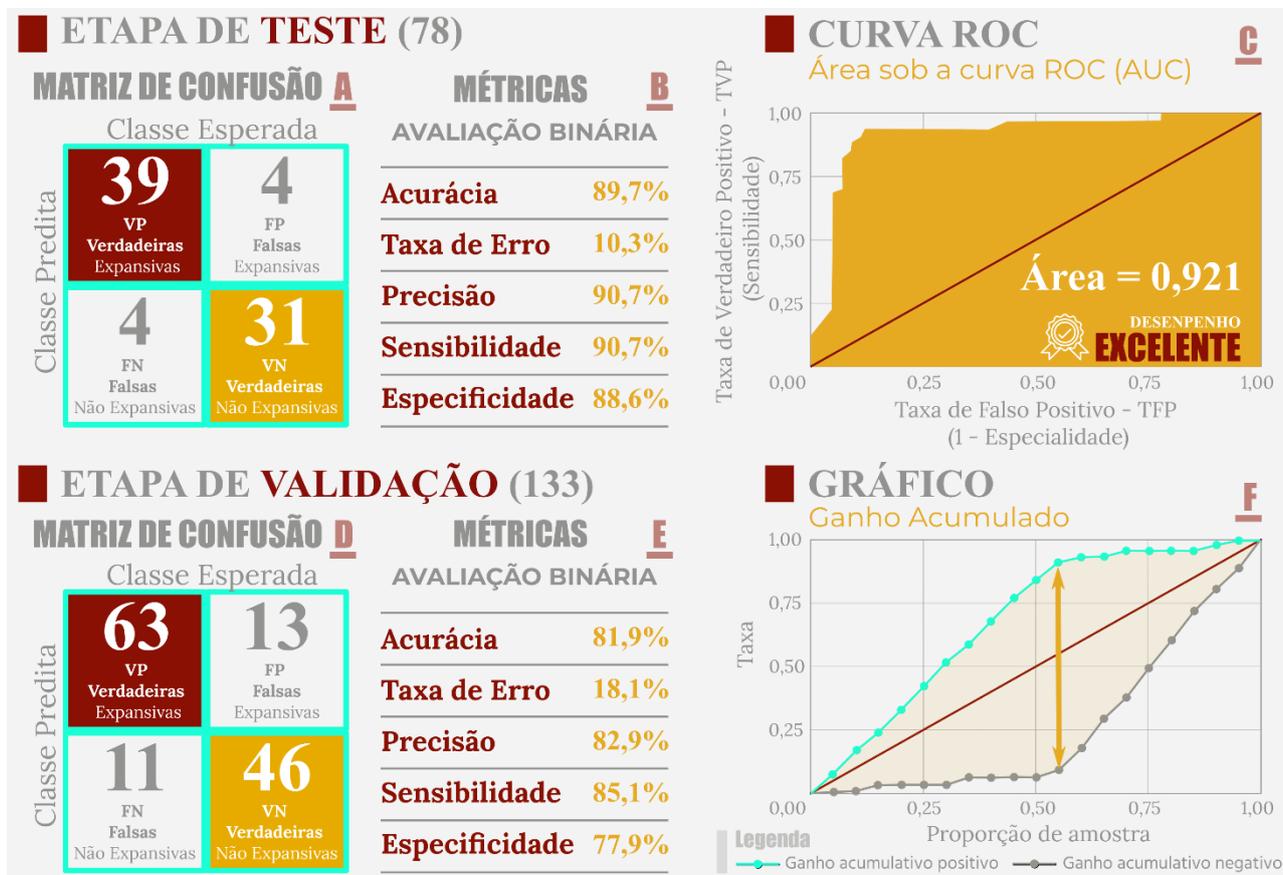
Métricas de Performance	Teste	Validação
VP	39	63
VN	31	46
FP	4	13
FN	4	11
Acurácia	89,7	81,9
Precisão	90,7	82,9

VP - Verdadeiras Expansivas, VN - Verdadeiras Não Expansivas, FP - Falsas Expansivas, FN - Falsas Não Expansivas.

Fonte: Autores (2023).

A Figura 5 apresenta as matrizes de confusão (Figura 5a e Figura 5d) e as métricas resultantes (Figura 5b e Figura 5e) referentes às etapas de teste e validação, respectivamente. A curva ROC, exposta na Figura 5c, é baseada na probabilidade de detecção, ou taxa de verdadeiros positivos (TPR) na probabilidade de falsos alarmes, ou taxa de falsos positivos (FPR) construída a partir da Taxa de VP (Verdadeiras Expansivas) e Taxa de FP, (Falsa Não Expansivas) pode ser verificada quantitativamente quando a área sob a curva ROC (AUC) é calculada. Segundo Dou et al. (2019), o desempenho de classificação dos modelos pode ser aferido de acordo com o valor da área calculada como: excelente (0,9-1), bom (0,8-0,9), razoável (0,7-0,8), ruim (0,6-0,7) e sem importância (< 0,5). O valor da AUC obtido para essa rede (0,921) mostra que modelo de treinamento resulta em uma configuração de excelente resultado.

Figura 5 – a) matriz de confusão da etapa de teste, b) métricas resultantes da etapa de teste, c) curva Roc, d) matriz de confusão da etapa de validação, e) métricas resultantes da etapa de validação e f) gráfico de ganho acumulado.



Fonte: Autores (2023).

No tocante ao gráfico de Ganho Acumulado, que represente um auxílio visual para análise de desempenho, observa-se que o reconhecimento da característica expansiva na população de amostras

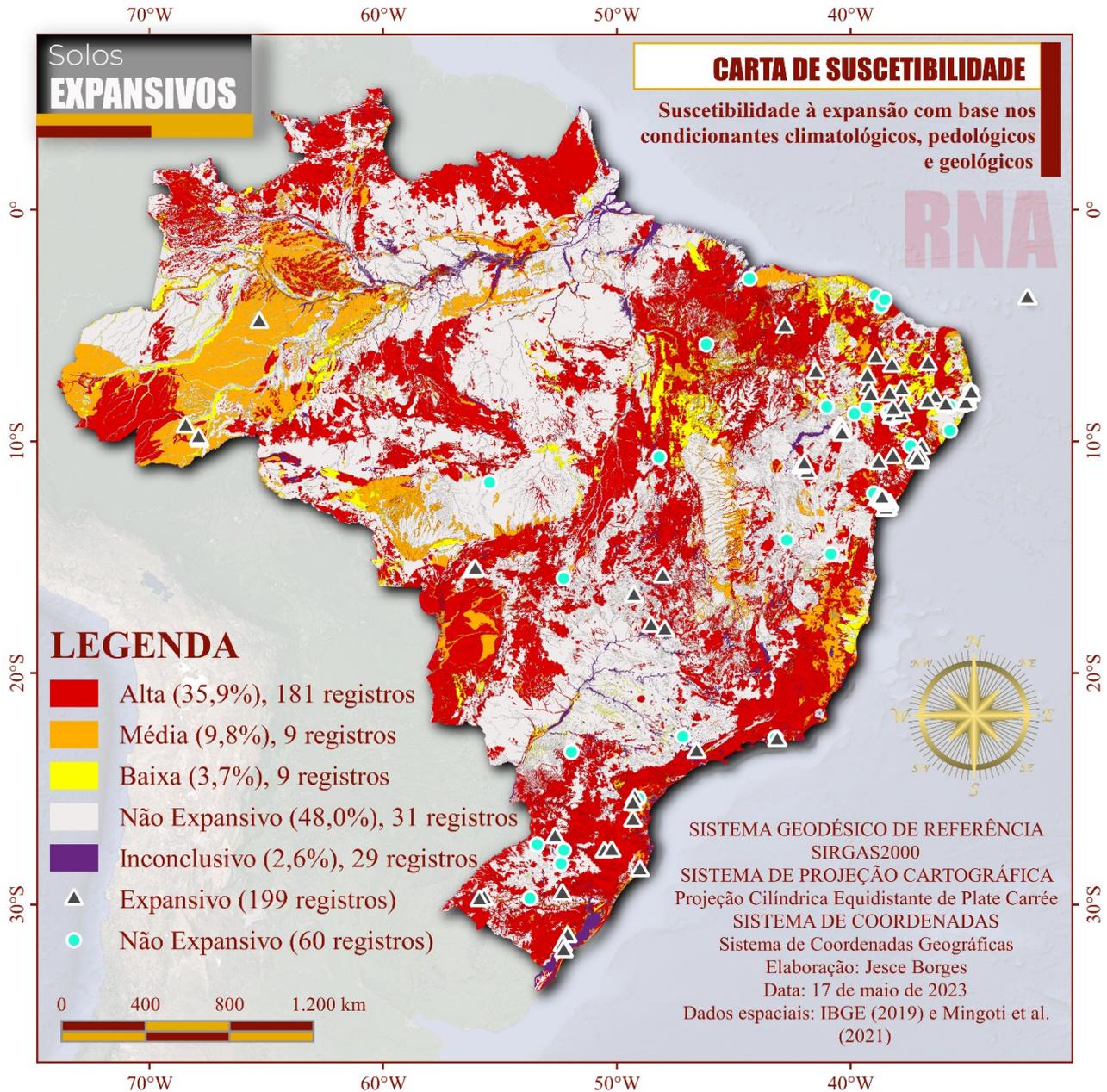
a serem classificadas tem uma maior identificação, ou seja, uma maior quantidade de amostras expansivas reconhecidas em detrimento das não expansivas, Figura 5f. Dessa forma, o momento de melhor desempenho de classificação da rede ocorre ao serem classificadas 55% das amostras com o reconhecimento de aproximadamente 90% das expansivas.

O modelo de identificação dos solos expansivos do Brasil, a partir das coordenadas do local, possui como resultado tanto a classificação binária, atribuindo 0 para não expansivos e 1 para expansivos, quanto para a classificação de acordo com a probabilidade de pertencer ao grupo de solos expansivos, cujos valores de probabilidade foram classificados em três graus de suscetibilidade a expansão: baixa (0,50-0,70), média (0,70-0,80) e alta (0,80-1,00), ressaltando que abaixo de 0,5 o solo é enquadrado como não expansivo.

Ao analisar a carta de suscetibilidade de ocorrência de solos expansivos no Brasil, Figura 6, verifica-se que um total de 3,7% (315.878 km²) da área apresenta suscetibilidade baixa, 9,8% (830.959 km²) média e 35,9% (3.056.921 km²) alta. As demais áreas foram enquadradas como ausente (sem comportamento expansivo) e inconclusivo (corpos de água, áreas urbanas e registros incompletos) que correspondem aos percentuais de 48% (4.092.428 km²) e 2,6% (221.849 km²), respectivamente. Ao realizar a superposição das 259 amostras sobre a carta, verificou-se que o modelo enquadrou 199 com característica expansiva (baixa - 9, média - 9 ou alta - 181), representando 76,8% de acertos.

No que concerne à suscetibilidade alta, é possível perceber que, na região Norte, os estados do Amapá, Roraima e Acre apresentam destaque em áreas mais críticas. Esse nível se faz presente na Região Nordeste, abrangendo a maioria dos estados. No Centro-Oeste, destaca-se o Mato Grosso do Sul, dado que apresenta extensão de área com níveis de suscetibilidade alta e média. Em relação ao Sudeste, observa-se a suscetibilidade alta, abrangendo a parte leste da região. Na região Sul, prevalece o nível de maior criticidade à expansão.

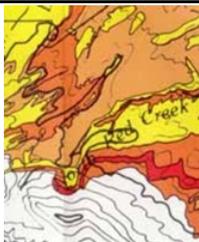
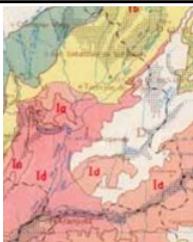
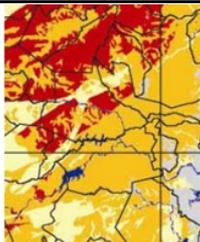
Figura 6 - Carta de suscetibilidade à expansão.



Fonte: Autores (2023).

A Tabela 2 apresenta uma análise comparativa envolvendo a carta interpretativa resultante deste trabalho e outros produtos cartográficos constantes na literatura pertinente à temática de solos expansivos.

Tabela 2 – Análise comparativa do produto cartográfico elaborado neste trabalho com outros presentes na literatura.

Análise Comparativa	Hart (1974)	Carcedo et al. (1986)	Amorim (2004)	Autores
Local mapeado	Colorado	Espanha	Pernambuco	Brasil
Área	21.000 km ²	505.992 km ²	98.312 km ²	8.510.345 km ²
Escala	1:100.000	1:1.000.000	1:600.000	1:1.000.000
Processos	Expansão	Expansão	Expansão e Colapso	Expansão e Colapso
Condicionantes	Geotécnicos e Geológicos	Geotécnicos, Geológicos e Climatológicos	Pedológicos, Geológicos e Climatológicos	Pedológicos, Geológicos e Climatológicos
Meio de apresentação	Cartografia em papel e relatório	Cartografia em papel e relatório	Cartografia digital em SIG e relatório	Cartografia digital em SIG
Níveis de suscetibilidades adotados	Muito alto, alto, moderado e baixo	Alto a muito alto, moderado a alto, baixo a moderado e nulo a baixo	Alto, médio e baixo	Alto, médio e baixo
Padrão cromático	Vermelho, laranja escuro, laranja claro e amarelo	Vermelho, laranja, amarelo e verde	Vermelho, laranja e amarelo	Vermelho, laranja e amarelo
Isenções de critério	Depósitos de areia e silte	Formações superficiais substrato não argiloso	Áreas onde não coincidia levantamento pedológico com geológico e algumas áreas urbanas	Corpos de água, áreas urbanas e campos sem informação
Universo Ensaiado	Sem informação	1400 ensaios de expansividade e 2000 ensaios de plasticidade	16 locais de investigação em solos expansivos e 11 em colapsíveis	259 locais de investigação em solos expansivos e 267 em colapsíveis
Peculiaridades	O levantamento avaliou apenas as áreas mais povoadas da região	O zoneamento não avaliou toda a área mapeada, muitos trechos sem informação	Não avaliação da suscetibilidade em apenas 2,1% da área avaliada por diferenças e particularidades das bases utilizadas	2,6% da área territorial não foi avaliada devido às particularidades das bases utilizadas.
Teoria do conhecimento	Subjetividade	Subjetividade	Subjetividade	Objetividade
Detalhe				

Fonte: Autores (2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de RNA, gerado a partir de banco de dados de solos especiais (BANDASE), apresentou acurácia de 89,7% e 81,9% na fase de treinamento e validação, respectivamente. Quanto à precisão, os percentuais foram de 90,7% e 82,9% nas fases citadas. O valor da área sob a curva ROC (AUC) de 0,921 enquadrou o desempenho do modelo com excelência, segundo a classificação de Dou et al. (2019).

A carta de suscetibilidade à expansão, oriunda de aplicação do modelo de Redes Neurais Artificiais sobre os atributos dos mapas fundamentais (clima, pedologia e geologia) para extensão territorial do Brasil, indica suscetibilidade de ocorrência alta em 35,9%, média em 9,8% e baixa em 3,7%, sem comportamento expansivo em 48% e inconclusivo (corpos de água, áreas urbanas e registros incompletos) em 2,6%

A carta de suscetibilidade à expansão tem caráter orientativo, configurando uma importante ferramenta na identificação de solo problemático do tipo expansivo durante a etapa de planejamento de um empreendimento. O uso do produto cartográfico não dispensa a investigação adequada em campo e em laboratório.

REFERÊNCIAS

AL-MUKHTAR, M.; KHATTAB, S.; ALCOVER, J. F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. **Engineering Geology**, v. 139–140, p. 17–27, 22 jun. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>

AL-RAWAS, A. A.; GOOSEN, M. F. A. (Orgs.). **Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment**. London: CRC Press, 2006. <https://doi.org/10.1201/9780203968079>

AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco**. 2004. 244 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

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**. 2020. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

AQUINO, A. E. B.; FERREIRA, S. R. M. Análise Geotécnica e Caracterização Geomecânica de um Solo Expansivo de Teresina-PI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2022. **Anais [...]**. Campinas: COBRAMSEG, 2022.

ASHAYERI, I.; YASREBI, S. Free-Swell and Swelling Pressure of Unsaturated Compacted Clays; Experiments and Neural Networks Modeling. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 27, n. 1, p. 137, 27 maio 2008. <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9219-y>

BASMA, A. A.; BARAKAT, A.; OMAR, M. Modeling Time Dependent Swell of Clays Using Sequential Artificial Neural Networks. **Environmental and Engineering Geoscience**, v. 9, n. 3, p. 279–288, 1 ago. 2003. <https://doi.org/10.2113/9.3.279>

BOWLES, J. E. **Foundation analysis and design**. New York: McGraw-Hill Education, 1988.

CARCEDO, F. J. A.; GIJÓN, M. F.; MAZO, C. O.; RODRÍGUEZ, J. L. S. **Mapa previsor de riesgos por expansividad de arcillas en España a escala 1: 1.000. 000**. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 1986.

CHEN, F. H. **Foundations on Expansive Soils**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co., 1988.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 933–942, jun. 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300003>

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; BASTOS, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das Várzeas de Sousa (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 311–324, abr. 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200011>

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, 2., 1982. **Anais [...]**. Recife: CBMSEF, 1982. v. 2, p. 193–209.

DORIS, J. J.; RIZZO, D. M.; DEWOOLKAR, M. M. Forecasting vertical ground surface movement from shrinking/swelling soils with artificial neural networks. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 32, n. 10, p. 1229–1245, jul. 2008. <https://doi.org/10.1002/nag.666>

DOU, S.; WANG, Y.; LU, J. Metazoan tsRNAs: Biogenesis, Evolution and Regulatory Functions. **Non-Coding RNA**, v. 5, n. 1, p. 18, 18 fev. 2019. <https://doi.org/10.3390/ncrna5010018>

ELKADY, T.; AL-MAHBASHI, A.; AL-SHAMRANI, M. Resilient modulus lime-treated expansive subgrade. In: 15 PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 2015. **Proceedings [...]**. Buenos Aires: Argentinian geotechnical society, 2015. p. 1631–1638.

FERREIRA, S. R. M. **Aplicações da Pedologia aos estudos dos Solos Colapsíveis e Expansivos**. 1990. Seminário de Qualificação Acadêmica ao Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação**. 1995. 379 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. M. **Mapa de risco a colapsibilidade e expansividade de solos do estado de Pernambuco–Geotecnia Ambiental**. Relatório Técnico. Recife: CNPQ, 1999.

FERREIRA, S. R. M. **Solos especiais: colapsíveis, dispersíveis, expansíveis**. Relatório Final. Recife: CNPQ, 1988.

FERREIRA, S. R. M.; ARAÚJO, A. G. D.; BARBOSA, F. A. S.; SILVA, T. C. R.; BEZERRA, I. M. L. Analysis of changes in volume and propagation of cracks in expansive soil due to changes in water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. e0190169, 25 nov. 2020. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190169>

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 779–791, 2009. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832009000400004>

FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F.; LEITE, J. G. D. B.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 771–780, ago. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400017>

GHAZIZADE, M. J.; SAFARI, E. Analysis of Desiccation Crack Depth in Three Compacted Clay Liners Exposed to Annual Cycle of Atmospheric Conditions with and without a Geotextile Cover. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143, n. 3, p. 06016024, mar. 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001607](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001607)

GOUTHAM, D. R.; KRISHNAIAH, A. J. Application of Artificial Neural Networking Technique to Predict the Geotechnical Aspects of Expansive Soil: A Review. **International Journal of Engineering and Manufacturing**, v. 11, n. 6, p. 48–53, 8 dez. 2021. <https://doi.org/10.5815/ijem.2021.06.05>

GUSMÃO FILHO, J. A.; SILVA, J. M. J. Field instrumentation as related to an expansive soil. In: PROCEEDINGS OF THE PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 9., 1991. **Proceedings** [...]. Vina Del Mar: ISSMGE, 1991. v. 9, p. 76–86.

HARIANTO, T.; HAYASHI, S.; DU, Y. J.; SUETSUGU, D. Effects of Fiber Additives on the Desiccation Crack Behavior of the Compacted Akaboku Soil as A Material for Landfill Cover Barrier. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 194, n. 1, p. 141–149, 1 out. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9703-2>

HART, S. S. **Potentially Swelling Soil and Rock**: In the Front Range Urban Corridor, Colorado. Denver: Colorado Geological Survey, Department of Natural Resources, State of Colorado, 1974.

HOLANDA, M. J. O. **Solos colapsíveis e expansivos no Brasil**: classificação da suscetibilidade de ocorrência aplicando redes neurais artificiais. 2022. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Brasil**: geologia. 2019a. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220768>. Acesso em: 17 abr. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Brasil**: pedologia. 2019b. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220925>. Acesso em: 17 abr. 2023.

IKIZLER, S. B.; AYTEKIN, M.; VEKLI, M.; KOCABAŞ, F. Prediction of swelling pressures of expansive soils using artificial neural networks. **Advances in Engineering Software**, v. 41, n. 4, p. 647–655, abr. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.advensoft.2009.12.005>

JUCÁ, J. F. T.; GUSMÃO FILHO, J. A.; JUSTINO, J. M. Laboratory and Field Teste on an Expansive Soil in Brasil. In: PROCEEDINGS OF THE 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 1992. **Proceedings** [...]. Texas: International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1992. p. 337–341.

KODIKARA, J.; COSTA, S. Desiccation Cracking in Clayey Soils: Mechanisms and Modelling. In: LALOUI, L.; FERRARI, A. (orgs.). **Multiphysical Testing of Soils and Shales**. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 21–32. DOI 10.1007/978-3-642-32492-5_2. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-32492-5_2. Acesso em: 20 set. 2022.

LIM, B. F.; SIEMENS, G. A. Unifying framework for modeling swelling soil behaviour. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53, n. 9, p. 1495–1509, set. 2016. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0049>

LIU, X.; BUZZI, O.; VAUNAT, J. Influence of stress-volume path on swelling behavior of an expansive clay. In: KHALILI, N.; RUSSELL, A.; KHOSHGHALB, A. (orgs.). **Unsaturated soils: research and applications**. Leiden: CRC Press, 2014. p. 931–937. <https://doi.org/10.1201/b17034-134>

MEROUANE, F. Z.; MAMOUNE, S. M. A. Prediction of Swelling Parameters of Two Clayey Soils from Algeria Using Artificial Neural Networks. **Mathematical Modelling in Civil Engineering**, v. 14, n. 3, p. 11–26, 1 set. 2018. <https://doi.org/10.2478/mmce-2018-0008>

MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; DAMACENO, T. G.; SIQUEIRA, C. A.; JACOMO, B. O. **Tipos climáticos, segundo classificação de Thornthwaite**. 2021. Geoinfo Embrapa Territorial. Disponível em: http://geoinfo.cnpem.embrapa.br/layers/geonode%3Atiposclimaticos_v1_thornthwaite_mingotietal2021. Acesso em: 6 out. 2022.

MOOSAVI, M.; YAZDANPANA, M. J.; DOOSTMOHAMMADI, R. Modeling the cyclic swelling pressure of mudrock using artificial neural networks. **Engineering Geology**, v. 87, n. 3–4, p. 178–194, nov. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.001>

MORAES, G. M.; XAVIER, F. A. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO FILHO, J. A.; OLIVEIRA, T. S. Chemical and structural characterization of soil humic substances under agroforestry and conventional systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1597–1608, out. 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500014>

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)**, v. 21, n. 2, p. 437–449, jun. 2016. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0041>

PEREIRA, E. M. **Estudo do potencial expansivo dos materiais argilosos da Formação Guabirotuba na região do Alto Iguaçu - PR**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

PERON, H.; HUECKEL, T.; LALOU, L.; HU, L. B. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 46, n. 10, p. 1177–1201, 2009.

PESSOA, A. D.; SOUSA, G. C. L.; ARAUJO, R. C.; ANJOS, G. J. M. Artificial neural network model for predicting load capacity of driven piles. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e12210111526, 4 jan. 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11526>

PRESA, E. P. Propriedades Geotécnicas das argilas expansivas do recôncavo Baiano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986. **Anais [...]**. Porto Alegre: COBRAMSEF, 1986. v. 8, p. 5–14.

RODRÍGUEZ, R.; SÁNCHEZ, M.; LEDESMA, A.; LLORET, A. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 44, n. 6, p. 644–658, 1 jun. 2007. <https://doi.org/10.1139/t07-016>

SANTOS, D. S.; MEDEIROS, C. E. B.; DRUMOND, M. A. M. M.; FERREIRA, S. R. M. Avaliação de suscetibilidade à ocorrência de solos expansivos e colapsíveis no estado de Sergipe com base na pedologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2022. **Anais [...]**. Campinas: COBRAMSEG, 2022.

SCHREINER, H. D. **State of the art review on expansive soils**. Transport and Road Research Laboratory, 1987.

SILVA, M. J. R. **Comportamento geomecânico de solos colapsíveis e expansivos em Petrolina-PE: cartas de suscetibilidade**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SIMÕES, P. R. M.; COSTA FILHO, L. M. Características Mineralógicas de Solos Expansivos do Recôncavo Baiano. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS, 1981. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1981. p. 569–588.

SOARES, A. B.; MAGALHÃES, P. R. F. Uso de argilas expansivas em camadas de impermeabilização de coberturas de aterros sanitários no Nordeste do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 6, p. 1069–1077, dez. 2021.

SOBRAL, H. S. **Contribuição ao Estudo do Massapê como solo para Construção**. 1956. Tese (Concurso Público para Livre Docência) – Universidade Federal da Bahia, 1956.

TANG, C. S.; SHI, B.; LIU, C.; SUO, W. B.; GAO, L. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. **Applied Clay Science**, v. 52, n. 1–2, p. 69–77, abr. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.032>

TANG, C. S.; WANG, D. Y.; SHI, B.; LI, J. Effect of wetting–drying cycles on profile mechanical behavior of soils with different initial conditions. **CATENA**, v. 139, p. 105–116, 1 abr. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.015>

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. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2022. **Anais [...]**. Campinas: COBRAMSEG, 2022.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. 1. ed. Centerton: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955. v. 8, (1).

VARGAS, M. The concept of Tropical Soils. In: PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1985. **Proceedings [...]**. Brasília: Brazilian Society for Soil Mechanics, 1985.

VARGAS, M.; GONÇALVES, H. H. S.; SANTOS, N. B.; MARINHO, F. A. M. Expansive soils in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1989. **Proceedings [...]**. Rio de Janeiro: [s. n.], 1989. p. 77–81.

VASCONCELOS, R. P. R. **Mapas de suscetibilidade de solos colapsíveis e expansivos do Estado de Pernambuco**. 2001. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2001.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos. In: DE CARVALHO, J. C.; JUNIOR, G. F. N. G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S. (orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: ABMS, 2015. p. 415–440.

YESILLER, N.; MILLER, C.; INCI, G.; YALDO, K. Desiccation and Cracking Behavior of Three Compacted Landfill Liner Soils. **Engineering Geology**, v. 57, n. 1–2, p. 105–121, 1 jun. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00022-3)

YUAN, S.; LIU, X.; SLOAN, S. W.; BUZZI, O. P. Multi-scale characterization of swelling behaviour of compacted Maryland clay. **Acta Geotechnica**, v. 11, n. 4, p. 789–804, ago. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0457-5>