XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.2/16

Integração de Business Intelligence, Inteligência Artificial e Computação em Nuvem no Mapeamento de Solos Colapsíveis e Expansivos do Brasil

Jesce John da Silva Borges
Doutor, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, jescejohn@gmail.com

Maria Júlia de Oliveira Holanda,
Doutora, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, mariajulia.holanda@ufpe.br

Larissa Ferreira Gomes de Araújo,
Doutoranda, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, larissa.ferreira@ufpe.br

Samuel Franca Amorim,
Professor Titular, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, samuel.famorim@ufpe.br

Silvio Romero de Melo Ferreira,
Professor Titular, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, silvio.romero@ufpe.br

RESUMO: Solos colapsíveis e expansivos representam problemas para a engenharia no Brasil, exigindo identificação para o planejamento territorial. O objetivo deste trabalho é integrar *Business Intelligence* (BI), Computação em Nuvem e Inteligência Artificial para aprimorar a gestão dessas informações geotécnicas. A metodologia envolveu a consolidação do Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE) utilizando o pacote *Google Workspace*, a elaboração de cartas de suscetibilidade via Redes Neurais Artificiais no programa QGIS, bem como o desenvolvimento de painéis no *Looker Studio* e aplicativos web na plataforma *Google Earth Engine* (GEE). A análise estatística revelou comportamento não paramétrico das variáveis. Nos resultados, baseando-se nas medianas, classificaram-se os solos colapsíveis como Areia Argilosa (SC) e os expansivos como Argila Siltosa de Alta Compressibilidade (CH-MH). O teste não paramétrico de *Mann-Whitney* apontou haver evidência suficiente para concluir que existe diferença estatisticamente significativa entre as medianas referentes às propriedades dos solos colapsíveis e expansivos. As cartas indicaram alta suscetibilidade ao colapso em 27,8% do território nacional e à expansão em 35,9%. Como produtos resultantes, obtiveram-se os Painéis de *Business Intelligence* de Solos Expansivos e Colapsíveis (PABISEC) e os Aplicativos de Solos Expansivos e Colapsíveis (APPSEC). Evidencia-se que estas plataformas oferecem visualizações interativas, transformando o grande volume de dados em conhecimento acessível e proporcionando suporte dinâmico à tomada de decisão em engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Expansivos e Colapsíveis, Cartas de suscetibilidade, Banco de Dados, *Business Intelligence*, Aplicativos.

ABSTRACT: Collapsible and expansive soils pose problems for engineering in Brazil, requiring identification for territorial planning. The objective of this work is to integrate Business Intelligence (BI), Cloud Computing, and Artificial Intelligence to improve the management of this geotechnical information. The methodology involved consolidating the Special Soils Database (BANDASE) using the Google Workspace suite, generating susceptibility maps via Artificial Neural Networks in QGIS software, as well as developing dashboards in Looker Studio and web applications on the Google Earth Engine (GEE) platform. Statistical analysis revealed non-parametric behavior of variables. In the results, based on medians, collapsible soils were classified as Clayey Sand (SC) and expansive ones as High Compressibility Silty Clay (CH-MH). The non-parametric Mann-Whitney test indicated sufficient evidence to conclude that there is a statistically significant difference between the medians regarding the properties of collapsible and expansive soils. The maps indicated high susceptibility to collapse in 27.8% of the national territory and to expansion in 35.9%. As resulting products,

the Expansive and Collapsible Soils Business Intelligence Dashboards (PABISEC) and the Expansive and Collapsible Soils Applications (APPSEC) were obtained. It is evidenced that these platforms offer interactive visualizations, transforming the large volume of data into accessible knowledge and providing dynamic support for decision-making in engineering.

KEYWORDS: Expansive and Collapsible Soils, Susceptibility Maps, Database, Business Intelligence, Applications.

1 INTRODUÇÃO

Os solos não saturados com comportamento instável, especificamente os colapsíveis e expansivos, impõem desafios à engenharia geotécnica brasileira. O desconhecimento sobre a ocorrência e o comportamento destes solos é frequentemente a causa raiz de patologias em fundações, pavimentos e infraestruturas urbanas, gerando prejuízos econômicos que poderiam ser mitigados com investigações preliminares adequadas (Ferreira, 1995).

No cenário atual, a engenharia civil vivencia a era da Indústria 4.0, onde a gestão eficiente de dados se torna um ativo valioso. Embora exista um volume considerável de pesquisas acadêmicas sobre solos especiais no Brasil, essas informações encontram-se historicamente dispersas em teses, dissertações e anais de congressos, dificultando o acesso rápido e a análise integrada por parte dos profissionais. A cartografia geotécnica tradicional, embora essencial, muitas vezes carece de dinamismo e interatividade, limitando-se a mapas estáticos que podem se tornar obsoletos rapidamente (Borges, 2024).

Diante dessa lacuna, este artigo apresenta uma abordagem multidisciplinar que integra Geotecnia, *Business Intelligence* (BI) e Ciência de Dados. O objetivo principal é detalhar a construção do Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE), a elaboração de cartas interpretativas, a implementação dos Painéis de *Business Intelligence* de Solos Expansivos e Colapsíveis (PABISEC) e o desenvolvimento dos Aplicativos de Solos Expansivos e Colapsíveis (APPSEC). Essa metodologia propõe uma mudança de paradigma: da consulta estática para a análise interativa, permitindo a democratização do conhecimento geotécnico e o suporte à tomada de decisão em projetos de engenharia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada integrou ferramentas de Geotecnia, Ciência de Dados e Geoprocessamento. Para a gestão e processamento, utilizou-se o pacote *Google Workspace* (*Drive,* Planilhas, Documentos), garantindo a integridade dos dados em nuvem (*Cloud Computing*). As análises espaciais foram realizadas no programa QGIS (versão 3.28 "*Firenze*") e as estatísticas no programa Jamovi (versão 2.3.21). Adicionalmente, empregou-se o *Google Looker Studio* para a estruturação dos painéis interativos de *Business Intelligence* e a plataforma *Google Earth Engine* (GEE) para o processamento de dados em nuvem e desenvolvimento dos aplicativos web.

2.1 Construção do Banco de Dados de Solos Especiais (BANDASE) e da Análise Estatística

O BANDASE representa a evolução de esforços anteriores de catalogação iniciados na década de 1990 (Ferreira, 1990). Para a sua consolidação atual, realizou-se uma Revisão Sistemática da Literatura abrangendo as principais bases de dados acadêmicas (Capes, SciELO, BDTD, Google Acadêmico).

A arquitetura do banco de dados foi desenvolvida inteiramente em ambiente de Computação em Nuvem (*Cloud Computing*), utilizando o *Google* Planilhas integrado ao *Google Drive*. Essa escolha estratégica permitiu a colaboração em tempo real da equipe de pesquisa e garantiu a integridade e segurança dos dados. O banco foi estruturado com atributos (campos) que abrangem identificação da obra, localização, propriedades físicas, mineralogia, resultados de ensaios de campo e laboratório, e classificação pedológica conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018).

A análise dos dados armazenados no BANDASE foi realizada com o auxílio do programa estatístico Jamovi. Inicialmente, aplicou-se o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* para verificar a distribuição das variáveis geotécnicas. Confirmada a predominância de distribuições não paramétricas, adotou-se a mediana como medida de tendência central para a caracterização dos solos. O teste não paramétrico de *Mann-Whitney* foi empregado para verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos de solos colapsíveis e expansivos.

2.2 Cartas de Suscetibilidade via Redes Neurais Artificiais (RNA)

Para a elaboração das cartas interpretativas baseadas em Inteligência Artificial, adotou-se o modelo de Rede Neural Artificial (RNA) denominado "BR03", desenvolvido por Holanda (2022). Este modelo foi estruturado a partir de uma amostra de 393 dados (237 para treinamento, 78 para seleção e 78 para teste) e utiliza como variáveis de entrada condicionantes climatológicos, pedológicos e geológicos.

O processamento geoespacial integrou três bases cartográficas fundamentais: (i) Tipos climáticos segundo Thornthwaite (Embrapa, 1:1.000.000); (ii) Pedologia (IBGE, 1:250.000); e (iii) Geologia/Províncias estruturais (IBGE, 1:250.000). Inicialmente, realizou-se a padronização do Sistema Geodésico de Referência para SIRGAS2000 (EPSG 4674) e a correção topológica de todas as camadas vetoriais no programa QGIS.

A metodologia consistiu na seleção dos campos de atributos pertinentes (tipos climáticos, ordem do solo e províncias estruturais), seguida pela aplicação das ferramentas de "Dissolve" (agregação de registros idênticos) e "União" (Union), resultando em uma única camada vetorial contendo a interseção dos três condicionantes.

A tabela de atributos resultante foi exportada (formato CSV) e processada no programa *Neural Designer*, onde se aplicou a equação matemática da RNA. O modelo retorna um índice numérico decimal variando de 0 a 1:

- Valores tendendo a 0 (zero) indicam alta suscetibilidade ao colapso;
- Valores tendendo a 1 (um) indicam alta suscetibilidade à expansão.

A definição das classes de suscetibilidade (alta, média e baixa) foi determinada pela análise de histogramas gerados a partir da sobreposição dos dados reais do BANDASE sobre a carta interpretativa. Áreas urbanas sem informação de condicionantes e corpos d'água foram excluídos da classificação.

2.3 Desenvolvimento dos Painéis de BI (PABISEC)

A arquitetura do PABISEC foi desenvolvida no ecossistema *Google Workspace*, utilizando o Drive como repositório em nuvem (*Data Warehouse*) e o *Google* Planilhas para estruturar os dados. O processamento no *Looker Studio* seguiu um fluxo metodológico de cinco etapas: (i) tratamento dos dados; (ii) conexão com a fonte de dados; (iii) modelagem (ajuste de dimensões e métricas); (iv) criação de visualizações analíticas; e (v) estruturação da interface de usuário com navegação lateral. O sistema opera com sincronização automática em tempo real, garantindo que qualquer inserção no BANDASE reflita instantaneamente nos painéis, eliminando a necessidade de reprocessamento manual.

2.4 Desenvolvimento dos Aplicativos (APPSEC)

Para a disponibilização dos produtos cartográficos em plataforma web, optou-se pelo desenvolvimento de aplicativos próprios, denominados APPSEC (Aplicativos de Solos Expansivos e Colapsíveis). Diante da robustez dos dados gerados nesta pesquisa (arquivos vetoriais superiores a 490 MB), utilizou-se o *Google Earth Engine* (GEE), uma plataforma de computação em nuvem que oferece alta capacidade de armazenamento e processamento de grandes conjuntos de dados geoespaciais (Gorelick et al., 2017).

O desenvolvimento envolveu o uso da linguagem de programação JavaScript (JS) para as funções lógicas e de geoprocessamento, HTML (*HyperText Markup Language*) e CSS (*Cascading Style Sheets*) para o design da interface gráfica. Preliminarmente, os dados espaciais (11 vetoriais e 3 matriciais) receberam tratamento no programa QGIS, onde tabelas de atributos complexas foram simplificadas e camadas vetoriais densas foram convertidas para formato raster (matricial) para viabilizar a importação no GEE. O algoritmo

final integrou cerca de 3.000 linhas de código em cada aplicativo, estruturando a visualização das cartas interpretativas e mapas fundamentais.

3 RESULTADOS

A integração das tecnologias descritas resultou em um ecossistema de dados robusto, cujos principais achados são discutidos a seguir.

3.1 Caracterização Geotécnica via BANDASE

A catalogação resultou em 526 registros validados, sendo 267 referentes a solos colapsíveis e 259 a solos expansivos. A análise estatística descritiva, baseada em medianas, revelou distinções claras quanto à textura: os solos expansivos apresentam maior concentração de frações finas, enquanto os colapsíveis predominam em frações grossas. Essa característica permitiu enquadrá-los, respectivamente, nas categorias de solos finos e grossos pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), e como Argila Siltosa e Areia Argilosa pela classificação triangular da *Mississippi River Commission* (Figura 1).

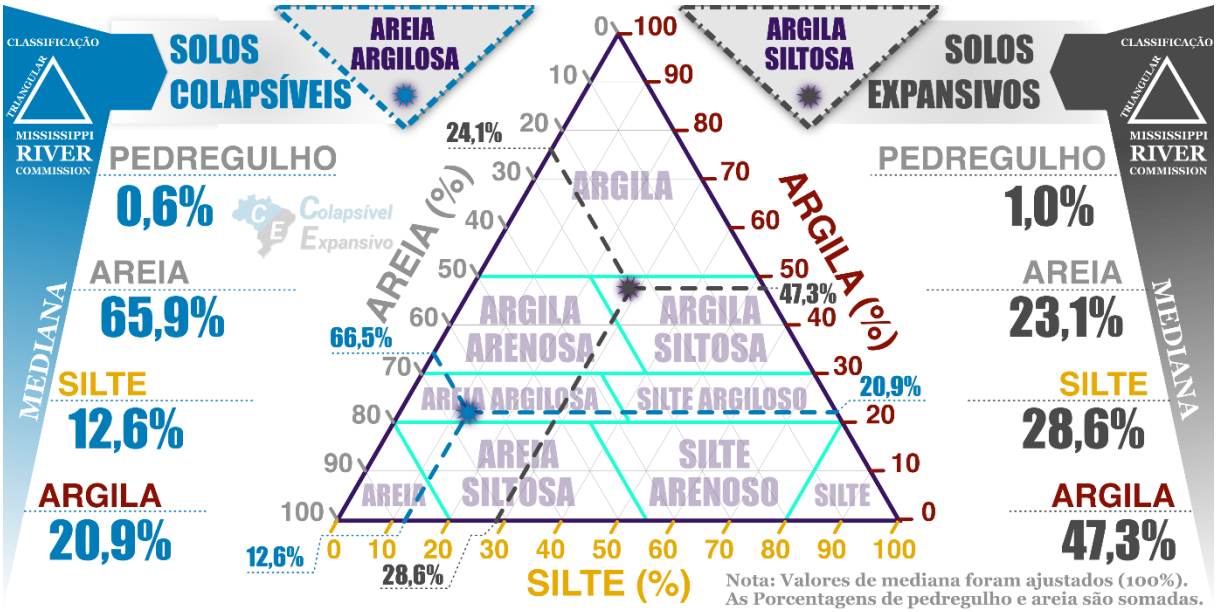


Figura 1. Classificação triangular da *Mississippi River Commission*.

Em relação à plasticidade, os solos expansivos exibem valores mais elevados nos limites de consistência, sendo classificados pelo SUCS como Argila Siltosa de Alta Compressibilidade (CH-MH). Em contraste, os solos colapsíveis foram categorizados como Areia Argilosa (SC).

A distinção entre os grupos foi validada estatisticamente pelo teste não paramétrico de *Mann-Whitney*, que apontou diferenças significativas entre as medianas das propriedades. Adicionalmente, os resultados mostraram-se compatíveis com as classificações das Redes Neurais PE04 e PE07 de Holanda (2022), corroborando o comportamento geotécnico identificado.

3.2 Cartas da Suscetibilidade (SIGSEC)

A aplicação do modelo de RNA resultou em duas cartas interpretativas. Para os solos colapsíveis, constatou-se alta suscetibilidade em 27,8% do território nacional (média em 3,4% e baixa em 16,8%). Geograficamente, as áreas críticas concentram-se na região Centro-Oeste (centro do MT, sul do MS e sul de GO), na porção oeste da região Sudeste (com destaque para SP) e no norte do Pará.

Em relação aos solos expansivos, a alta suscetibilidade abrange 35,9% da área (média em 9,8% e baixa em 3,7%). A ocorrência predominou nas regiões Nordeste e Sul, estendendo-se à faixa litorânea do Sudeste

(SP ao ES) e aos estados do AC, AP, RR e RJ. Notou-se uma correlação direta entre a alta suscetibilidade e a ocorrência da classe Vertissolo no Nordeste e Pantanal (Figura 2).

A validação do modelo, realizada pela superposição dos registros pontuais do BANDASE sobre as cartas geradas, demonstrou boa eficácia preditiva. A aplicação da Matriz de Confusão resultou nas seguintes métricas: acurácia de 74,3%, sensibilidade de 72,1% e especificidade de 77,4%.

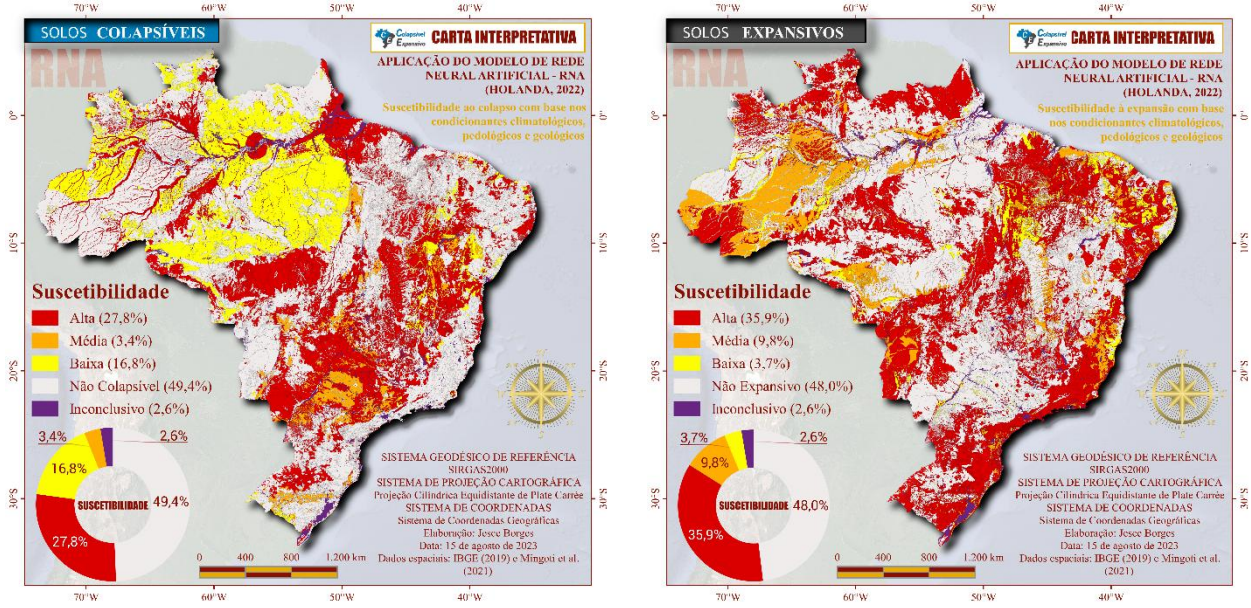


Figura 2. Carta interpretativa resultante da aplicação de RNA para solos colapsíveis e expansivos.

3.3 *Business Intelligence* e Interatividade (PABISEC)

Os Painéis de *Business Intelligence* de Solos Expansivos e Colapsíveis (PABISEC) materializa o conceito de *Business Intelligence* aplicado à geotecnia, transformando o volume massivo de dados do BANDASE em conhecimento. A plataforma é composta por 6 (seis) painéis interativos (Tabela 1), acessíveis via web, que permitem análises desde a escala continental até a municipal:

- PABISEC - Climatologia: explora a classificação de Thornthwaite (1948), permitindo visualizar os tipos climáticos e as suscetibildiade ao colapso e à expansão;
- PABISEC - Pedologia: detalha a taxonomia dos solos brasileiros (ordens, subordens e grandes grupos), evidenciando a predominância de Latossolos (31,7%) e permitindo correlações com os critérios de suscetibilidade ao colapso e à expansão;
- PABISEC - Cartas Interpretativas: apresenta os resultados dos métodos convencionais (critérios conservador, ponderado e inverso), facilitando a comparação visual entre diferentes cenários;
- PABISEC - Cartas RNA: exibe os resultados do modelo de Inteligência Artificial, incluindo métricas de validação (matriz de confusão);
- PABISEC - BANDASE: focado na caracterização geotécnica, este painel inova ao permitir que o usuário acesse os dados atinentes aos solos colapsíveis e expansivos, bem como plote seus próprios dados (LL, IP, %Argila) para gerar automaticamente Cartas de Plasticidade e Atividade, verificando o enquadramento em critérios de colapso/expansão em tempo real;
- PABISEC - Pernambuco: um recorte regional que digitaliza e torna interativo o mapeamento de Amorim (2004).

Tabela 1. Acesso aos Painéis de *Business Intelligence* (PABISEC).

Painel PABISEC	Link de Acesso	QR Code
Climatologia	Acessar Painel	
Pedologia	Acessar Painel	
Cartas Interpretativas	Acessar Painel	
Cartas Interpretativas RNA	Acessar Painel	
BANDASE	Acessar Painel	
Pernambuco	Acessar Painel	

As funcionalidades implementadas englobam filtragem dinâmica (por Estado, tipo de solo), possibilitando análises visuais instantâneas. A integração com bases do Google assegura a geolocalização dos pontos de coleta, democratizando o acesso a informações que antes estavam dispersas em documentos estáticos (Figura 3).

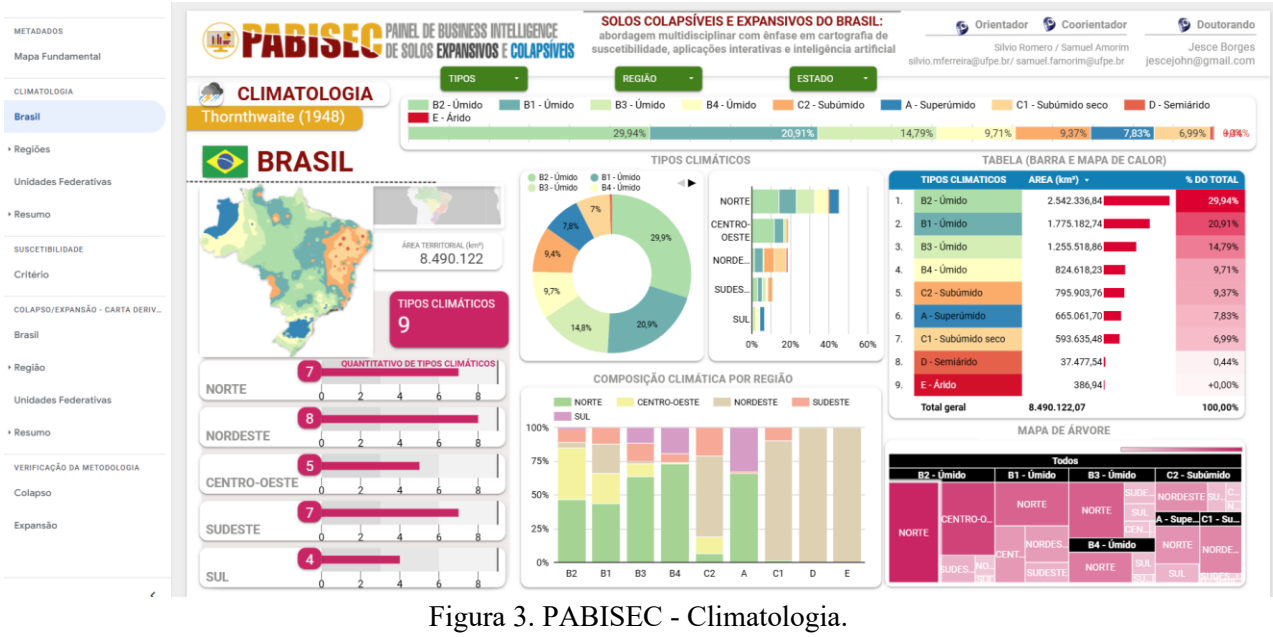


Figura 3. PABISEC - Climatologia.

3.4 Aplicativos de Solos Expansivos e Colapsíveis (APPSEC)

Como resultado do processamento em nuvem, foram obtidos 3 (três) aplicativos web interativos, acessíveis via navegador e independentes de sistema operacional. Os aplicativos foram segmentados conforme a abrangência e a metodologia de origem dos dados:

- APPSEC - PE: disponibiliza os produtos cartográficos elaborados por Amorim (2004) para o estado de Pernambuco;
- APPSEC - BR: apresenta as cartas de suscetibilidade e mapas fundamentais desenvolvidos para todo o território nacional (Borges, 2024);
- APPSEC - BR RNA: dedicado exclusivamente às cartas interpretativas elaboradas por Borges (2024) a partir do modelo matemático de Redes Neurais Artificiais desenvolvido por Holanda (2022).

Tabela 2. Acesso aos Aplicativos de Solos Expansivos e Colapsíveis (APPSEC).

Painel APPSEC	Link de Acesso	QR Code
Pernambuco	Acessar Painel	
Brasil	Acessar Painel	
Brasil RNA	Acessar Painel	

Essas ferramentas proporcionam benefícios diretos à engenharia prática, tais como: acessibilidade e gratuidade, permitindo consulta por qualquer dispositivo com internet; ausência de instalação, eliminando a necessidade de programas SIG pesados; e interatividade, permitindo que o usuário adicione marcadores em locais de obra para obter instantaneamente a classificação da suscetibilidade do solo (alta, média ou baixa) e os atributos pedológicos locais (Figura 4).

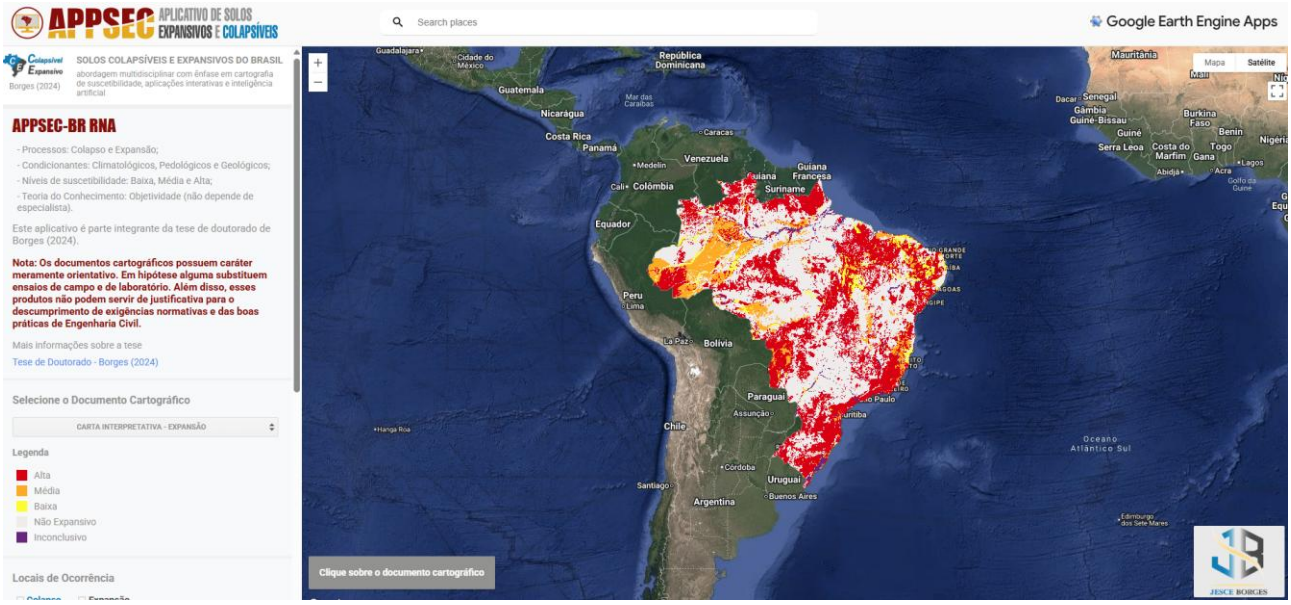


Figura 4. APPSEC – Brasil RNA.

4 CONCLUSÕES

A pesquisa demonstrou que a integração entre a Engenharia Geotécnica e as tecnologias de Ciência de Dados é viável e essencial para mitigar os riscos associados aos solos não saturados.

O desenvolvimento do BANDASE consolidou o conhecimento geotécnico disperso, revelando, através da estatística descritiva, distinções claras de comportamento físico dos dois solos. Os solos colapsíveis caracterizam-se predominantemente como Areia Argilosa (SC), enquanto os expansivos se enquadram como Argila Siltosa de Alta Compressibilidade (CH-MH). O teste de *Mann-Whitney* confirmou a significância estatística dessas diferenças, fornecendo parâmetros de referência (medianas) úteis para anteprojetos.

As cartas de suscetibilidade, elaboradas via Redes Neurais Artificiais, indicaram alta suscetibilidade ao colapso em 27,8% do território nacional e à expansão em 35,9%.

Por fim, a implementação dos painéis PABISEC e dos aplicativos APPSEC introduz uma inovação na forma como consumimos dados geotécnicos. Ao migrar da cartografia estática para plataformas dinâmicas em nuvem, o trabalho democratiza o acesso à informação, oferecendo à comunidade técnica ferramentas ágeis para a identificação preliminar. Ressalta-se, contudo, que tais produtos possuem caráter orientativo e não substituem a realização de ensaios de campo e laboratório específicos para cada obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorim, S. F. (2004) *Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 244 p.

Borges, J. J. S. (2024) *Solos Colapsíveis e Expansivos do Brasil: Abordagem Multidisciplinar com Ênfase em Cartografia de Suscetibilidade, Aplicações Interativas e Inteligência Artificial*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Ferreira, S. R. M. (1990) Banco de dados de solos especiais: colapsíveis do estado de Pernambuco. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Salvador. *Anais...* ABMS. p. 81–86.

Ferreira, S. R. M. (1995) *Colapso e Expansão de Solos Não Saturados do Nordeste Brasileiro. Tese de Doutorado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, v. 202, p. 18–27.

Holanda, M. J. O. (2022) *Solos colapsíveis e expansivos no Brasil: classificação da suscetibilidade de ocorrência aplicando redes neurais artificiais*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Santos, H. G. et al. (2018) *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed., Embrapa, Brasília, 356 p.