

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), o texto completo desse trabalho será disponibilizado no repositório a partir de 05/03/2028.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia



Ministério da Ciência,
Tecnologia e Inovações



THYAGO ANTHONY SOARES LIMA

**MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE DE
SUBSIDÊNCIA DO SOLO COM BASE EM DADOS INSAR
USANDO FREQUENCY RATIO E LÓGICA FUZZY-
MACEIÓ (AL)**

THYAGO ANTHONY SOARES LIMA

**MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE DE SUBSIDÊNCIA DO SOLO COM BASE EM
DADOS INSAR USANDO FREQUENCY RATIO E LÓGICA FUZZY- MACEIÓ (AL)**

Tese apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de São José dos Campos; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), como parte dos requisitos para obtenção do título de DOUTOR pelo Programa de Pós-Graduação em DESASTRES NATURAIS.

Área: Desastres Naturais. Linha de pesquisa: Desastres associados a eventos extremos, inundações e movimentos de massa.

Orientadora: Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões

Coorientador: Prof. Dr. Mahdi Motag

São José dos Campos

2026

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2026]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Lima, Thyago Anthony Soares

Mapeamento de Suscetibilidade de Subsidência do Solo com Base em Dados InSAR Usando Frequency Ratio e Lógica Fuzzy- Maceió (AL) / Thyago Anthony Soares Lima. - São José dos Campos : [s.n.], 2026.
189 f. : il.

Tese (doutorado) - Pós-graduação em Desastres Naturais - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2026.

Orientador: Silvio Jorge Coelho Simões

Coorientador: Mahdi Motag

1. Subsidência urbana multicausal. 2. Deformação vertical do terreno. 3. Monitoramento interferométrico. 4. Zoneamento de suscetibilidade. 5. áreas urbanas costeiras. I. Simões, Silvio Jorge Coelho, orient. II. Motag, Mahdi, coorient. III. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. V. Universidade Estadual Paulista (UNESP). VI. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). VII. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa possui impacto potencial em três dimensões complementares: (i) científica, ao avançar na compreensão espacial e multicausal da subsidência em escala municipal; (ii) técnico-operacional, ao produzir um mapa de suscetibilidade com base em evidências InSAR e modelagem integrativa; e (iii) socioinstitucional, ao oferecer subsídios objetivos para priorização territorial de ações de monitoramento e mitigação em uma cidade marcada por crise urbanística associada à subsidência. Do ponto de vista científico, a tese contribui ao integrar um inventário SBAS-InSAR (2016–2024) com variáveis condicionantes geológicas, geomorfológicas, estruturais, hidroambientais e de uso/ocupação do solo, permitindo discutir como diferentes mecanismos e controles do meio físico podem organizar padrões de deformação. Ao enfatizar a possibilidade de subsidências fora do perímetro minerário, o estudo reforça uma leitura multicausal e espacialmente explícita do fenômeno, evitando interpretações determinísticas e favorecendo abordagens baseadas em evidências, incerteza e transições ambientais. No âmbito técnico-operacional, o principal produto é um conjunto de mapas de suscetibilidade derivado de dois paradigmas complementares, Frequência Relativa e Lógica Fuzzy, com capacidade de apoiar: (a) a definição de áreas prioritárias para instrumentação e monitoramento (p.ex., marcos geodésicos, GNSS, estações de medições, inspeções sistemáticas); (b) diagnósticos geotécnicos em setores de maior favorabilidade; (c) o planejamento de intervenções urbanas (drenagem, controle de cargas, restrições de uso, manutenção de vias e redes); e (d) a revisão de recortes territoriais e zonas de atenção, com critérios reproduzíveis. A abordagem também tende a favorecer a comunicação técnica, ao traduzir múltiplas camadas físicas em superfícies de favorabilidade comparáveis e atualizáveis. Quanto ao impacto socioinstitucional, os produtos podem subsidiar políticas públicas voltadas à redução de risco e aumento da resiliência urbana, contribuindo para maior racionalidade na alocação de recursos e para a priorização de ações em áreas onde o risco pode evoluir de forma silenciosa e cumulativa. Ao propor um arcabouço metodológico replicável, a tese tem potencial de extrapolação para outras cidades brasileiras sujeitas a subsidência multicausal, reforçando a integração entre sensoriamento remoto, geociências e gestão de desastres.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research has potential impact across three complementary dimensions: (i) scientific, by advancing the spatial and multicausal understanding of land subsidence at the municipal scale; (ii) technical–operational, by delivering a susceptibility map grounded in InSAR evidence and integrative spatial modelling; and (iii) socio-institutional, by providing objective support for the territorial prioritisation of monitoring and mitigation actions in a city shaped by an urban crisis associated with subsidence. From a scientific perspective, the thesis contributes by integrating an SBAS-InSAR deformation inventory (2016–2024) with conditioning variables of geological, geomorphological, structural, hydro-environmental, and land-use/land-cover nature, enabling assessment of how different mechanisms and physical controls may organise deformation patterns. By highlighting the potential for subsidence outside the mining perimeter, the study reinforces a multicausal and spatially explicit interpretation of the phenomenon, avoiding deterministic narratives and favouring approaches grounded in evidence, uncertainty, and environmental transitions. In technical–operational terms, the main output is a set of susceptibility maps derived from two complementary paradigms—Frequency Ratio and Fuzzy Logic—with the capacity to support: (a) the definition of priority areas for instrumentation and monitoring (e.g., geodetic benchmarks, GNSS, total stations, and systematic inspections); (b) geotechnical diagnostics in higher-favourability sectors; (c) the planning of urban interventions (drainage, load management, land-use restrictions, and maintenance of roads and utility networks); and (d) the revision of territorial delineations and zones of attention using reproducible criteria. The approach also tends to strengthen technical communication by translating multiple physical layers into comparable and updatable favourability surfaces.

Regarding socio-institutional impact, the products can inform public policies aimed at risk reduction and enhanced urban resilience, contributing to more rational resource allocation and to the prioritisation of actions in areas where risk may evolve silently and cumulatively. By proposing a replicable methodological framework, the thesis has potential for transfer to other Brazilian cities affected by multicausal subsidence processes, reinforcing the integration of remote sensing, geosciences, and disaster risk management.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Silvio Jorge Coelho Simões (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT)

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)

Campus São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

Dr^a. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT)

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)

São José dos Campos, São Paulo, Brasil

Dr. Márcio Roberto Magalhães Andrade

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT)

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)

São José dos Campos, São Paulo, Brasil

Dr^a. Nivaneide Alves de Melo Falcão

Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

Instituto de Geografia e Meio Ambiente (IGDEMA)

Maceió, Alagoas, Brasil

Dr. Luis Ricardo Dias da Costa

Agência Portuguesa do Ambiente (APA)

Faro, Algarve, Portugal

São José dos Campos, 05 de Março de 2026.

DEDICATÓRIA

À memória do Professor Dr. Peter Hatspacher (*in memoriam*), meu orientador inicial, cuja generosidade intelectual e humana continua a iluminar meus passos mesmo na ausência.

E a todas as vítimas da subsidência do solo em Maceió e no Brasil, famílias deslocadas, territórios interrompidos, vidas redesenhadas pela perda, especialmente àquelas que permanecem sem voz, para que esta pesquisa também seja um gesto de reconhecimento, registro e reparação possível.

AGRADECIMENTOS

Há caminhos acadêmicos que se constroem com método, disciplina e rigor. Mas há também aqueles que, por trás de cada página escrita, carregam gestos silenciosos de cuidado, encontros improváveis e pessoas que, em momentos decisivos, nos lembram por que ainda vale a pena seguir. Por isso, estes agradecimentos são, antes de tudo, uma forma de reconhecer que esta tese não nasceu apenas de dados e análises, nasceu de vínculos, confiança e presença.

À Professora Dra. Magdalena Vassileva, deixo meu agradecimento mais especial, carinhoso e profundo. Você foi muito além do ensinamento técnico: foi referência, abrigo e força nos momentos em que o cansaço quase falava mais alto. Sua orientação precisa, generosa e humana, me ensinou não apenas a fazer ciência com rigor, mas a fazê-la com sensibilidade, escuta e responsabilidade. Levo comigo o que aprendi com você e levo, sobretudo, aquilo que não se escreve em método algum: a gratidão por uma presença que sustenta, que acalma e que reacende, mesmo quando tudo parece pesado. Em você encontrei uma combinação rara de excelência e humanidade; e, por isso, parte do que sou hoje na pesquisa, e do que consegui atravessar para chegar até aqui, tem o seu nome.

Ao Professor Dr. Silvio Jorge Coelho Simões, minha gratidão pela acolhida e pela condução cuidadosa ao longo desses anos. Você me recebeu como herança do Professor Peter e, com isso, assumiu também uma responsabilidade que poucos abraçam com tamanha grandeza. Aprendi com você o valor da dedicação, do diálogo, das pessoas e do compromisso verdadeiro com a ciência. Carregarei sempre suas orientações que, como o senhor mesmo diz, “vão além de reuniões formais”. Obrigado por estar presente neste momento e por me ajudar a traçar o caminho rumo ao meu sonho profissional.

Ao Professor Dr. Mahdi Motagh, agradeço pela oportunidade de compreender a subsidência com profundidade, por me instigar a enxergar novas perspectivas, por propor desafios que ampliaram meu horizonte científico e por oferecer suporte constante, na pesquisa e na vida. Muito obrigado por ter aceitado fazer parte desta minha (nossa) caminhada com dedicação e confiança.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, Dr. José Paulo Monteiro, Dr. Luis Ricardo Dias da Costa, Dr. Marcio Roberto Magalhães de Andrade, Dr. Cassiano Antônio Bortolozzo, Dr. Rodolfo Moreda Mendes, Dr. Rogério Galante Negri, Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes, Dra. Nivaneide Alves de Melo Falcão e Dr. Luis Gustavo de Moura Reis, deixo meu reconhecimento pelas contribuições técnicas, críticas e indispensáveis, que fortaleceram a pesquisa e elevaram a qualidade do trabalho.

Aos professores e amigos Dr. Jessé Marques, Dr. Marcelo Reis e Dr. Alessandro Sarmiento, registro minha gratidão pelo apoio no início da minha caminhada, quando tudo ainda era construção, incerteza e aprendizado. Em especial, ao Jessé Marques, deixo um agradecimento destacado e muito sincero: sua confiança, orientação e incentivo nos primeiros passos fizeram diferença real, foram suporte, direção e impulso quando eu mais precisava. Obrigado por abrir portas, por acreditar

e por somar de forma tão generosa.

À Professora Dra. Nivaneide Falcão e ao Professor Dr. Bruno, por me aceitarem e me guiarem no estágio docencia. Sou eternamente grato.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para viabilizar a realização desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Capes) - Código de Financiamento 88887984816/2024-00.

Ao professor Dr. Enner Alcântara, pelo apoio em publicação.

Ao Professor Dr. Zhuge Xia, pelo apoio em artigo, e a Fundação de Ciências Naturais da Província de Jiangsu, China, pelos Fundos de Pesquisa Fundamental para as Universidades Centrais, que permitiram publicação de resultados parciais da tese.

Ao amigo Don Gordon, por sua disponibilidade para treinarmos inglês e apoio

Aos grandes amigos e amigas da pós-graduação e também de fora dela, especialmente daqueles espaços de trabalho que viraram extensão da vida, deixo minha gratidão pelo convívio, pela ajuda, pelo apoio e pela diversão. Em muitos dias, vocês foram o lembrete mais simples e mais verdadeiro: ninguém faz um doutorado sozinho. (Não citarei nomes, por uma questão política, mas quem é de verdade, sabe quem é de mentira)

Ao meu amado filho, Benjamin, minha dedicatória diária e meu motivo mais forte. Você foi luz, foi impulso e foi direção. Em cada madrugada de escrita, em cada mapa revisado, em cada capítulo finalizado, havia uma parte de mim pensando no futuro, e esse futuro tem o seu nome. Obrigado por existir, por me ensinar amor em estado puro e por me lembrar que todo esforço só faz sentido quando a vida volta a caber no peito.

Aos meus irmãos de escolha, Leo e Luciano, agradeço pelo apoio constante e por estarem presentes em momentos decisivos ao longo destes quatro anos. O suporte de vocês, às vezes em palavra, às vezes em atitude, às vezes apenas em presença, foi mais importante do que imaginam.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se realizasse. Que esta tese seja também um retorno: à ciência, às pessoas e ao território que a inspirou, com compromisso, respeito e responsabilidade.

“Informação, dados, conhecimento e ciência são poder. E, como todo poder, há quem queira mantê-los restritos, apenas para si. Por isso, democratizar o acesso não é opção — é necessidade.”

— **Aaron Swartz**

RESUMO

LIMA, T. A. S. **Mapeamento de Suscetibilidade de Subsidência do Solo com base em dados InSAR usando *Frequency Ratio* e Lógica *Fuzzy*- Maceió (AL).** 2026. Tese (Doutorado em Desastres Naturais) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2026.

A subsidência do solo constitui um perigo geológico de caráter progressivo, capaz de produzir danos cumulativos à infraestrutura urbana, às edificações e à funcionalidade do território, com repercussões socioeconômicas relevantes. Esta tese tem como área de estudo o município de Maceió, capital do estado de Alagoas, localizado no litoral nordestino brasileiro, onde a subsidência associada à mineração de sal-gema consolidou-se como uma crise urbana complexa, marcada por forte heterogeneidade espacial, prejuízos e deformações que afetaram mais de 60.000 pessoas e remodelaram a paisagem da cidade, com evacuações e a formação de áreas esvaziadas. Entretanto, como a subsidência é um fenômeno multicausal e relativamente recorrente em ambientes urbanos, parte-se da hipótese de que a subsidência no município não se restringe ao núcleo diretamente afetado pela mineração, podendo ocorrer também em outros setores da cidade, em função de combinações entre condicionantes geológico-estruturais e geomorfológicos, dinâmica hidrogeológica, propriedades de depósitos inconsolidados e intervenções antrópicas (p.ex., aterros, carregamentos e alterações de drenagem). Assim, embora a crise recente em Maceió seja frequentemente atribuída à extração de sal-gema, a ocorrência de subsidência para além da área de mineração no território municipal pode refletir a atuação de diferentes mecanismos, com expressões espaciais e temporalidades distintas. Nesse contexto, esta tese desenvolve e aplica um arcabouço metodológico replicável para mapeamento de suscetibilidade à subsidência, tendo o município de Maceió como área de demonstração. O objetivo é mapear a suscetibilidade à subsidência do solo em toda a área do município, integrando produtos InSAR e modelagem espacial. Para isso, foi elaborado um inventário de deformação a partir de séries temporais SBAS-InSAR (Sentinel-1, 2016–2024) e estimados modelos de suscetibilidade por Frequência Relativa e Lógica *Fuzzy*, relacionando a ocorrência de subsidência com variáveis condicionantes de natureza geológica, geomorfológica, estrutural, hidroambiental e de uso e ocupação do solo. Os resultados indicam um padrão de suscetibilidade espacialmente heterogêneo, com setores de maior favorabilidade distribuídos além do núcleo minerário historicamente reconhecido, evidenciando a relevância de controles morfoestruturais e de condições do meio físico na concentração e na propagação das deformações. A comparação entre os modelos revela complementaridades: a Frequência Relativa fornece uma interpretação objetiva do papel relativo dos condicionantes, enquanto a Lógica *Fuzzy* representa de forma contínua as transições de favorabilidade, reduzindo a dependência de limiares rígidos e favorecendo a leitura em zonas de borda e áreas de transição. Os mapas finais constituem um produto técnico-científico de suporte ao planejamento urbano, à priorização de monitoramento e à gestão territorial do risco, além de oferecerem um protocolo operacional transferível para outras cidades brasileiras e internacionais sujeitas a processos de subsidência multicausal.

Palavras-chave: subsidência urbana multicausal; deformação vertical do terreno; condicionantes geológico-geomorfológicos; compartimentação morfoestrutural; áreas urbanas costeiras; zoneamento de suscetibilidade, modelagem espacial, monitoramento interferométrico.

ABSTRACT

LIMA, T. A. S. Mapping of Land Subsidence Susceptibility based on InSAR data using Ratio Frequency and Fuzzy Logic – Maceió (AL). 2026. Thesis (Doctorate degree in Natural Disaster) - São Paulo State University (UNESP), Institute of Science and Technology, National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden), São José dos Campos, 2026.

Land subsidence constitutes a progressive geological hazard capable of producing cumulative damage to urban infrastructure, buildings, and the functional organisation of the territory, with significant socioeconomic repercussions. This thesis focuses on the municipality of Maceió, the capital of the state of Alagoas, located on the northeastern coast of Brazil, where subsidence associated with rock-salt mining has become a complex urban crisis, marked by strong spatial heterogeneity, losses, and ground deformation that have affected more than 60,000 people and reshaped the city's landscape through evacuations and the formation of emptied urban areas. However, since subsidence is a multicausal phenomenon and relatively recurrent in urban environments, this thesis is based on the hypothesis that subsidence in the municipality is not restricted to the core area directly affected by mining, but may also occur in other sectors of the city as a result of combinations of geological–structural and geomorphological conditioning factors, hydrogeological dynamics, the properties of unconsolidated deposits, and anthropogenic interventions, such as landfills, surface loading, and drainage alterations. Thus, although the recent crisis in Maceió is frequently attributed to rock-salt extraction, the occurrence of subsidence beyond the mining area within the municipal territory may reflect the action of different mechanisms, with distinct spatial expressions and temporal behaviours. In this context, this thesis develops and applies a replicable methodological framework for subsidence susceptibility mapping, using the municipality of Maceió as a demonstration area. The objective is to map land subsidence susceptibility across the entire municipal area by integrating InSAR products and spatial modelling. To this end, a deformation inventory was produced from SBAS-InSAR time series derived from Sentinel-1 data for the period 2016–2024, and susceptibility models were estimated using Frequency Ratio and Fuzzy Logic approaches. These models relate the occurrence of subsidence to geological, geomorphological, structural, hydro-environmental, and land-use and land-cover conditioning variables. The results indicate a spatially heterogeneous susceptibility pattern, with sectors of higher favourability distributed beyond the historically recognised mining core, highlighting the relevance of morphostructural controls and physical-environmental conditions in the concentration and propagation of ground deformation. The comparison between the models reveals complementary strengths: the Frequency Ratio approach provides an objective interpretation of the relative role of the conditioning factors, whereas Fuzzy Logic continuously represents transitions in favourability, reducing dependence on rigid thresholds and improving the interpretation of edge zones and transitional areas. The final maps constitute a technical-scientific product to support urban planning, monitoring prioritisation, and territorial risk management. They also provide an operational protocol that can be transferred to other Brazilian and international cities affected by multicausal subsidence processes.

Keywords: multicausal urban subsidence; vertical ground deformation; geological–geomorphological conditioning factors; morphostructural compartmentalization; coastal urban areas; susceptibility zoning, spatial modeling, interferometric monitoring

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Geometria de visada (<i>LOS</i>) do InSAR em passagens ascendente e descendente.....	36
Figura 2 - Fluxograma de Construção do Inventário de Subsidência	42
Figura 3 - Exemplos esquemáticos de funções de pertinência fuzzy (linear crescente, sigmoidal e gaussiana).	54
Figura 4 - Climatologia Mensal- Precipitação e Temperatura	67
Figura 5 - Localização da Cidade de Maceió	69
Figura 6 - Padrão Geomorfológico de Maceió	71
Figura 7 - Mapa de Hipsometria (a) e Mapa de Declividade (b)	72
Figura 8 - Perfil Geológico de Maceió	73
Figura 9 - Mapa de Unidades Geológicas com Inserção de Falhas (A); Lineamentos (B).....	75
Figura 10 - Mapa de Unidades Hidrogeológicas.....	77
Figura 11 - Mapa de Uso do solo	79
Figura 12 - Fluxograma Metodológico	81
Figura 13 - Fluxograma de Processamento InSAR.....	86
Figura 14 - Rede de <i>Baselines</i>	86
Figura 15 – Representação das Macro-Áreas.....	93
Figura 16 - Mapa LOS Vertical Negativo Acumulado – 2016-2024 (A), Mapa Média mensal LOS Vertical(B).	94
Figura 17 - Mosaicos de <i>LOS</i> Vertical Negativo – 2016-2024 (A1 a A7).....	95
Figura 18 - Série Temporal – 2016-2024 (A1 a A4).....	96
Figura 19 - Série Temporal – 2016-2024 (A5 a A7).....	97
Figura 20 - Mapa de <i>Hotspots</i> de Subsidência – 2016-2024 (A1 a A7)	100
Figura 21 - Barras Empilhadas por Macro-Áreas (Km ²) e Total de % do <i>Footprint</i>	101
Figura 22 - Gráfico de Cristas por Macro-Areas.....	102
Figura 23 - Inventário binário de ocorrência (0/1) após padronização espacial	104
Figura 24 - <i>Ranking</i> de contribuição relativa dos condicionantes (mediana de ln(FR) por variável; barras de erro = min–máx por variável)	112
Figura 25 - Grau de Suscetibilidade à Subsidência FR.....	114
Figura 26 - Taxa de acerto do inventário por classe de suscetibilidade (FR)	115
Figura 27 - Curva cumulativa de acertos (FR).....	116
Figura 28 - Curva ROC do modelo FR	117
Figura 29 - Robustez (<i>5-Fold</i>) do modelo FR.....	118
Figura 30 - <i>Ranking</i> Por Classes Variáveis Categóricas (Pertinência <i>Fuzzy</i>)	123
Figura 31 - Curvas de Pertinência <i>Fuzzy</i> por Variáveis	125
Figura 32 - Grau de Suscetibilidade à Subsidência Lógica Fuzzy	128
Figura 33 - Taxa de Acerto do Inventário por Classe (<i>Fuzzy</i>)	130
Figura 34 - Curva Cumulativa <i>Fuzzy</i>	131
Figura 35 - Curva ROC do modelo Lógica <i>Fuzzy</i>	132
Figura 36 - Robustez do Modelo <i>Fuzzy</i>	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese dos mecanismos e controles físicos da subsidência	28
Tabela 2 - Principais fontes de erro em InSAR, efeitos e estratégias de mitigação	39
Tabela 3 - Comparativo dos Métodos - Vantagens e limites	57
Tabela 4 - Base de dados	84
Tabela 5 - Macro-áreas de valores + negativos (A1–A7) e bairros associados (inventário 2016–2024).....	91
Tabela 6 - Pontos amostrais do inventário por macro-área	98
Tabela 7 - Valores reportados por Lima et al. (2025) por macro-área (pontos distintos).....	99
Tabela 8 - Extensão (km ²) das classes S1/S5/S10 por macro-área (A1–A7) e participação no <i>footprint</i>	101
Tabela 9- Síntese do domínio espacial utilizado na modelagem	105
Tabela 10 - Variáveis condicionantes utilizadas na modelagem de suscetibilidade	106
Tabela 11 - Distribuição da Variável Categórica Geologia no Domínio Efetivo	107
Tabela 12 - Distribuição da Variável Categórica Geomorfologia no Domínio Efetivo.....	107
Tabela 13 - Distribuição da Variável Categórica Hidrogeologia no Domínio Efetivo	108
Tabela 14 - Distribuição da Variável Categórica Uso do Solo no Domínio Efetivo	108
Tabela 15 - Distribuição da Variável no Domínio Efetivo	109
Tabela 16 - Estatísticas básicas do domínio <i>fuzzy</i> (pixels, área e proporções).	118
Tabela 17 - Variáveis utilizadas na modelagem <i>fuzzy</i>	121
Tabela 18 - Pertinência <i>fuzzy</i> por classe (exemplos representativos) – A tabela completa no Anexo C, com todas as variáveis e classes)	124
Tabela 19 - Sensibilidade do operador <i>Fuzzy Gamma</i> e síntese dos resultados (<i>prediction rate</i>).	127
Tabela 20 - Estatísticas descritivas dos valores de suscetibilidade à subsidência	127
Tabela 21 - Taxa de acerto do inventário por classe de suscetibilidade <i>fuzzy</i>	130
Tabela 22 - Síntese comparativa do desempenho e da aplicabilidade dos modelos de Frequência Relativa e Lógica <i>Fuzzy</i>	134

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Conceitos Fundamentais e Enquadramento do Problema	22
2.1.1 Definições Operacionais.....	22
2.1.2 Perigo, Suscetibilidade, Vulnerabilidade e Risco	23
2.1.3 Escalas (Local–Urbana–Municipal) e Implicações	25
2.1.4 A subsidência no contexto brasileiro de gestão de riscos e desastres	26
2.2 Mecanismos e Controles Físicos da Subsidência	27
2.2.1 Subsidência por Compactação e Adensamento	29
2.2.2 Subsidência por Rebaixamento Piezométrico e Compactação de Aquíferos....	30
2.2.3 Subsidência por Dissolução/Cárstica (Carbonatos e Evaporitos).....	30
2.2.4 Subsidência por Mineração Subterrânea.....	31
2.2.5 Subsidência Induzida por Urbanização e Intervenções	32
2.2.6 Subsidência por Fatores Naturais, Expressões Geomorfológicas e Controle Estrutural.....	33
2.3 Medição e Monitoramento: Fundamentos de InSAR Aplicados à Subsidência..	35
2.3.1 Princípio Interferométrico e Geometria LOS	35
2.3.2 InSAR Multitemporal: PSI, SBAS e Híbridos.....	37
2.3.3 Erros e Fontes de Incerteza em InSAR	38
2.3.4 Série Temporal e Interpretação	40
2.4 Inventário de Subsidência: Conceito, Extração e Critérios	41
2.4.1 O que é Inventário em Suscetibilidade.....	41
2.4.2 Definição de Ocorrência e Limiares	43
2.4.3 Unidades de Mapeamento e Amostragem.....	44
2.4.4 Qualidade do Inventário.....	45
2.5 Fatores Condicionantes: Seleção, Fundamentos e Operacionalização.....	45
2.5.1 Critérios de Seleção.....	46
2.5.2 Fatores Geológicos e Estruturais	46
2.5.3 Fatores Geomorfológicos e Topográficos.....	47
2.5.4 Fatores Hidroambientais	48
2.5.5 Fatores Antrópicos e Uso/Ocupação.....	49
2.5.6 Multicolinearidade, Independência e Escala (MAUP).....	50

2.6 Modelagem de Suscetibilidade: Fundamentos e Escolhas Metodológicas	51
2.6.1 Paradigmas de Modelagem	51
2.6.2 Frequência Relativa (FR / <i>Frequency Ratio</i>).....	52
2.6.3 Lógica <i>Fuzzy</i> Aplicada à Geociência.....	53
2.6.4 Integração Multicritério e Ponderação	55
2.6.5 Comparabilidade Entre Modelos (FR vs Fuzzy)	56
2.7 Validação, Desempenho e Incerteza	57
2.7.1 Validação do Inventário e do Modelo.....	57
2.7.2 Métricas.....	58
2.7.3 Incertezas	60
2.7.4 Interpretação Operacional	61
2.8 Estado da Arte Aplicado: Contexto, Histórico, Subsídios da Literatura para o Caso de Maceió e Lacunas.....	62
2.8.1 Histórico do Caso de Subsidência em Maceió e Institucionalização do Problema (1970s–2025)	62
2.8.2 Produção Técnico-Científica Sobre Maceió: Relatórios, Artigos, Mapeamentos (Convergências e Divergências)	63
2.8.3 Estudos Internacionais Análogos e Lições para o Caso de Maceió	64
2.8.4 Lacuna que esta Tese Preenche.....	66
3- ÁREA DE ESTUDO, DADOS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	67
3.1 Área de Estudo: Localização e Caracterização Físico-Ambiental.....	67
3.1.1 Compartimentação Geomorfológica e Topografia Urbana	70
3.1.2 Arcabouço Geológico e Controle Estrutural	73
3.1.3 Hidroambiente, Drenagem Urbana e Conectividade Lagunar	76
3.1.4 Uso e Ocupação do Solo, Impermeabilização e Infraestrutura urbana	78
3.2 Base de Dados, Metodologia e Critérios de Qualidade	80
3.3 InSAR: Configuração, Produtos e Máscaras de Observabilidade	85
3.4 Inventário de Ocorrência (InSAR) e Construção do Conjunto Amostral	87
3.5 Fatores Condicionantes: Engenharia de Variáveis, Padronização e Checagens. 87	
3.6 Modelagem por Frequency Ratio (FR): Implementação Operacional.....	88
3.7 Modelagem por Lógica Fuzzy: Desenho do Sistema e Calibração	89
3.8 Validação, Desempenho e Incerteza	90
4 RESULTADOS.....	91

4.1 Inventário Municipal de Subsidência (2016–2024) A Partir de SBAS-InSAR: Produtos, Macro-Áreas, Síntese Estatística e Padrões Espaciais Da Deformação....	91
4.2 Modelagem de Suscetibilidade por <i>Frequency Ratio</i> (FR)	103
4.2.1 Preparação do Inventário e Padronização Espacial	103
4.2.2 Discretização e Descrição das Variáveis Condicionantes	105
4.2.3 Contribuição Relativa dos Condicionantes: Ranking Interpretável das Variáveis.....	111
4.2.4 Mapa final de Suscetibilidade por <i>Frequency Ratio</i> (FR).....	113
4.2.5 Checagens Internas e Coerência Espacial.....	115
4.2.6 Validação (ROC/AUC) e Robustez – FR.....	116
4.3 Modelagem de Suscetibilidade por Lógica <i>Fuzzy</i>.....	118
4.3.1 Domínio, Inventário e Padronização Espacial (Lógica <i>Fuzzy</i>).....	118
4.3.2 Conjunto de Condicionantes e Estrutura dos Dados <i>Fuzzy</i>	119
4.3.3 Superfícies de Pertinência <i>Fuzzy</i> e Comportamento das Variáveis.....	121
4.3.4 Integração Multivariada por Operadores <i>Fuzzy</i>	125
4.3.5 Mapa final de Suscetibilidade à Subsidência pelo Modelo de Lógica <i>Fuzzy</i>	127
4.3.6 Checagens Internas e Coerência Espacial do Modelo <i>Fuzzy</i>	129
4.3.7 Validação e Robustez do Modelo <i>Fuzzy</i>	131
4.3.8 Síntese comparativa entre os modelos FR e Lógica <i>Fuzzy</i>	134
5 DISCUSSÃO	136
5.1 O Inventário de Subsidência como Evidência Empírica de um Sistema Urbano Instável	136
5.2 Causa Primária: Mineração de Halita e Formação da Bacia de Subsidência...	137
5.3 Causas Secundárias: Sedimentos Holocênicos, Recalque Urbano e Sobrecarga	138
5.4 Controle Estrutural: Falhas e Lineamentos como Organizadores do Campo de Deformação	140
5.5 Hidrogeologia como Fator Modulador da Suscetibilidade.....	141
5.6 Significado Comparativo dos Modelos FR e Lógica <i>Fuzzy</i>	143
5.7 Limitações Metodológicas e Efeito do Domínio Urbano e Rural.....	145
5.8 Risco de Subsidência: da Suscetibilidade Física à Produção Territorial do Risco	146

5.9 Implicações Científicas e Territoriais da Suscetibilidade à Subsidência em Maceió	148
5.10 Integração Causal e Leitura Geográfica da Subsidência Urbana em Maceió: Espaço, Território e Desigualdade.....	149
6 CONCLUSÃO	153
REFERÊNCIAS	156
ANEXOS	173

1 INTRODUÇÃO

A subsidência do solo é reconhecida como um perigo geológico de evolução tipicamente progressiva, com capacidade de gerar danos cumulativos e de longo prazo sobre a infraestrutura urbana, a estabilidade de edificações e a funcionalidade do território, frequentemente com efeitos socioeconômicos desproporcionais em contextos de alta vulnerabilidade e baixa capacidade de monitoramento (GALLOWAY; BURBEY, 2011; BAGHERI-GAVKOSH et al., 2021; HERRERA-GARCÍA et al., 2021). Em escala global, a subsidência vem sendo tratada como um desafio transversal à gestão de recursos hídricos, ao planejamento urbano e à redução de risco de desastres, associando-se a mecanismos distintos, desde a compactação de aquíferos por rebaixamento piezométrico, até a dissolução de evaporitos, processos cársticos, adensamento/recompactação de depósitos inconsolidados, carregamentos antrópicos, aterros e reconfigurações de drenagem, que podem atuar isoladamente ou de forma combinada, produzindo assinaturas espaciais e temporais contrastantes (GALLOWAY; BURBEY, 2011; BAGHERI-GAVKOSH et al., 2021; HERRERA-GARCÍA et al., 2021; TOMÁS et al., 2014). Essa diversidade de condicionantes reforça que a subsidência, embora por vezes catalisada por um agente dominante bem definido, é frequentemente um fenômeno multicausal no qual o “porquê” e o “onde” dependem de controles morfoestruturais, litológicos, hidrogeológicos e de uso e ocupação do solo, além da história de intervenções humanas no espaço urbano.

Nas últimas décadas, a consolidação das técnicas interferométricas baseadas em Radar de Abertura Sintética (InSAR) permitiu observar deformações milimétricas a centimétricas de maneira sinótica, repetitiva e espacialmente explícita, superando limitações recorrentes de redes geodésicas esparsas e de monitoramento local. Em particular, abordagens multitemporais, como SBAS (*Small Baseline Subset*), ampliaram a capacidade de reconstruir séries temporais de deformação e, com isso, de diferenciar tendências persistentes de flutuações transitórias, além de mapear “zonas” de subsidência com gradientes suaves e extensões urbanas relevantes (BERARDINO et al., 2003; LANARI et al., 2007; TOMÁS et al., 2014). Além do SBAS, consolidaram-se abordagens multitemporais baseadas em alvos coerentes em áreas urbanas, como *Permanent Scatterers* (PS), abordagens e métodos híbridos, amplamente empregadas para monitoramento de deformações com elevada densidade espacial em cenários urbanos complexos (FERRETTI et al., 2001; HOOPER, 2008; CROSETTO et al., 2016).

A literatura internacional demonstra a utilidade dessas técnicas tanto em ambientes

fortemente urbanizados quanto em áreas condicionadas por dissolução de evaporitos ou por depleção aquífera, evidenciando que o monitoramento por InSAR é particularmente decisivo quando a deformação ocorre de forma lenta, silenciosa e com impactos cumulativos que só se tornam socialmente “visíveis” quando os danos já se instalaram (CHAUSSARD et al., 2013; TOSI et al., 2013; MOTAGH et al., 2017; SAMSONOV; BARYAKH, 2020). Ao mesmo tempo, o avanço recente de sínteses e mapeamentos globais tem reforçado que a subsidência não é uma excepcionalidade local, mas um risco difuso e crescente em múltiplas regiões, demandando produtos territoriais comparáveis, reprodutíveis e operacionalizáveis na escala do planejamento (BAGHERI-GAVKOSH et al., 2021; HERRERA-GARCÍA et al., 2021).

No Brasil, a subsidência vem ganhando centralidade a partir de casos com grande repercussão urbana, mas ainda persiste um cenário de heterogeneidade de dados, lacunas de monitoramento sistemático e assimetria entre a dimensão do problema e a disponibilidade de produtos técnico-operacionais contínuos em escala municipal (LIMA; SIMÕES, 2025). Nesse contexto, Maceió, capital do estado de Alagoas, tornou-se um dos exemplos mais emblemáticos de crise urbana associada à subsidência: análises multitemporais com sensoriamento remoto e investigações técnicas documentaram deformações progressivas vinculadas à mineração de sal-gema, com deslocamentos, evacuações e perda funcional de porções do tecido urbano, afetando dezenas de milhares de pessoas e conduzindo a esvaziamentos territoriais que reconfiguraram a dinâmica socioespacial da cidade (SGB/CPRM, 2019; EUILLADES et al., 2020; VASSILEVA et al., 2021; HARTWIG et al., 2023; TEIXEIRA et al., 2024; MANTOVANI et al., 2024; LIMA et al., 2025).

Episódios críticos recentes, como a aceleração de danos, eventos geotécnicos e a ruptura superficial associada ao colapso/instabilização em 2023, reforçaram a necessidade de compreender não apenas a magnitude da subsidência no núcleo minerário, mas também a sua expressão espaço-temporal em escala de cidade, sobretudo diante de um arcabouço geológico-estrutural complexo e de um contexto urbano costeiro onde diferentes mecanismos podem coexistir (HARTWIG et al., 2023; MANTOVANI et al., 2024; LIMA; SIMÕES, 2025; HARTWIG et al., 2025; LIMA et al., 2025).

Entretanto, reduzir a subsidência em Maceió a uma leitura monocausal, centrada exclusivamente na mineração, é insuficiente para responder às demandas científicas e territoriais que emergem da observação em escala municipal. O fenômeno da subsidência é relativamente recorrente em ambientes urbanos e pode ocorrer independentemente de atividades minerárias, especialmente onde depósitos inconsolidados, condições

hidrogeológicas sensíveis e intervenções antrópicas contínuas criam predisposições ao adensamento diferencial, ao recalque e à reorganização de tensões no subsolo (GALLOWAY; BURBEY, 2011; BAGHERI-GAVKOSH et al., 2021; HERRERA-GARCÍA et al., 2021). Em cidades costeiras, a vulnerabilidade pode ser agravada por processos naturais de compactação sedimentar e por variações no nível/pressão de água subterrânea, além de alterações antrópicas que modificam o balanço hídrico e o regime de carregamento do terreno (ABIDIN et al., 2011; GALLOWAY; BURBEY, 2011; BAGHERI-GAVKOSH et al., 2021). Assim, a hipótese orientadora desta tese é que a ocorrência e a distribuição espacial das deformações em Maceió podem refletir a atuação concomitante de múltiplos condicionantes e mecanismos, com temporalidades distintas e diferentes graus de dependência, exigindo uma abordagem que seja, ao mesmo tempo, *city-wide*, baseada em evidências observacionais e sensível às transições ambientais e morfoestruturais, muito embora Maceió seja o caso de maior repercussão no Brasil, a abordagem adotada nesta tese é estruturada para ser replicável, sendo Maceió tratada como área de aplicação e validação de um arcabouço metodológico que pode ser adaptado a outras cidades sujeitas à subsidência multicausal.

É nesse ponto que a noção de suscetibilidade adquire centralidade. Enquanto o mapeamento de perigo (*hazard*) envolve probabilidade de ocorrência em um intervalo temporal, a suscetibilidade descreve a propensão espacial à ocorrência do fenômeno, sem impor, por definição, uma janela temporal explícita, mas assumindo que futuras ocorrências tendem a se manifestar sob condições semelhantes às que favoreceram ocorrências pretéritas (BIANCHINI et al., 2019; CHUNG; FABBRI, 1999; CHUNG; FABBRI, 2003). Na prática, em ambientes urbanos onde a subsidência pode resultar de controles múltiplos, mapas de suscetibilidade tornam-se uma ponte entre a observação (inventários de deformação derivados de InSAR) e a decisão (priorização territorial para monitoramento, inspeções, diagnósticos geotécnicos, restrições de uso e intervenção em infraestrutura). Nesse domínio, métodos estatísticos bivariados como a Frequência Relativa/*Frequency Ratio* (FR) são amplamente aplicados por sua implementação direta e por fornecerem medida objetiva do peso relativo de classes condicionantes na presença/ausência do fenômeno, com uso consolidado em estudos de suscetibilidade a processos que geram (LEE; PRADHAN, 2006; YILMAZ, 2009; CHOI et al., 2012). Em paralelo, abordagens baseadas em Lógica *Fuzzy*, que são alicerçadas na lógica multivalorada e na representação de graus de pertinência entre 0 e 1, oferecem uma forma consistente de modelar transições e incertezas, reduzindo dependência de limiares rígidos e permitindo integrar variáveis contínuas e categóricas de modo mais compatível com a natureza

gradual de muitos controles ambientais (ZADEH, 1965; BIANCHINI et al., 2019). A literatura recente também tem expandido variações *fuzzy* para tratar incertezas na avaliação de fatores de subsidência, reforçando a pertinência desse arcabouço quando se busca explicitar, e não ocultar, a ambiguidade inerente a sistemas urbanos complexos (GHOUSHCHI et al., 2024).

Com base nessa convergência entre (i) a capacidade observacional do InSAR multitemporal, (ii) a necessidade de leitura municipal e multicausal da subsidência em Maceió e (iii) a demanda por produtos aplicáveis à gestão territorial do risco, esta tese desenvolve e aplica um arcabouço metodológico replicável para mapeamento de suscetibilidade à subsidência urbana, tendo Maceió (Alagoas) como caso demonstrativo. Para isso, propõe o mapeamento de suscetibilidade de subsidência do solo na área urbana do município a partir de um inventário de deformação derivado de séries temporais SBAS-InSAR (Sentinel-1, 2016–2024) e da modelagem espacial por Frequência Relativa e Lógica *Fuzzy*. A estratégia integra variáveis condicionantes de natureza geológica, geomorfológica, estrutural, hidroambiental e de uso e ocupação do solo, buscando interpretar como controles do meio físico e intervenções antrópicas organizam padrões de deformação e definem setores de maior favorabilidade, inclusive além do núcleo minerário historicamente reconhecido (SGB/CPRM, 2019; MANTOVANI et al., 2024; LIMA et al., 2025).

Ao produzir superfícies de suscetibilidade comparáveis por dois paradigmas complementares, FR, com interpretação objetiva do papel relativo de classes, e *Fuzzy*, com modelagem contínua de transições, a tese busca não apenas mapear “onde é mais favorável” ocorrer subsidência, mas oferecer um instrumento tecnicamente auditável para orientar prioridades de monitoramento e mitigação. Ao mesmo tempo, ao estruturar o procedimento em etapas reprodutíveis (inventário InSAR, harmonização em grade regular, seleção e padronização de condicionantes e validação), o estudo explicita um protocolo transferível para outras cidades brasileiras e internacionais, desde que disponham de séries InSAR e de camadas condicionantes equivalentes, permitindo diagnósticos comparáveis em contextos urbanos submetidos a subsidência multicausal.

6 CONCLUSÃO

Esta tese teve como objetivo central desenvolver, testar e aplicar um arcabouço metodológico replicável para mapear e interpretar a suscetibilidade à subsidência do solo, integrando um inventário interferométrico SBAS-InSAR e modelos de suscetibilidade espacial baseados em *Frequency Ratio* (FR) e Lógica *Fuzzy*, tendo Maceió (AL) como área de demonstração. Mais do que produzir mapas, o trabalho buscou compreender a subsidência como fenômeno urbano-territorial complexo, multicausal e espacialmente contínuo, inserido em um contexto de produção histórica do espaço costeiro e de intensa transformação antrópica.

Os resultados obtidos permitem afirmar que a subsidência em Maceió não pode ser compreendida como um conjunto de ocorrências pontuais nem como processo restrito ao perímetro minerário. O inventário derivado de séries temporais SBAS-InSAR (2016–2024) evidenciou um campo contínuo de deformação urbana, estruturado em gradientes espaciais, no qual coexistem zonas de subsidência acelerada, áreas de deformação persistente de baixa taxa e extensas regiões de transição. Essa configuração reforça a inadequação de leituras binárias do tipo “afetado” versus “não afetado” e sustenta a adoção de abordagens baseadas em suscetibilidade relativa, particularmente úteis para a gestão preventiva em ambientes urbanos.

Em termos quantitativos, os dados foram harmonizados em grade regular de 10 m, operando em um domínio observável de 458.731 células, com 167.126 ocorrências (36,43%) e 291.605 não-ocorrências; ao exigir cobertura simultânea em todas as variáveis, o domínio efetivo de modelagem totalizou 444.633 pixels válidos. No desempenho preditivo, o modelo FR apresentou $AUC = 0,688$ (success rate) e $AUC = 0,695$ (prediction rate), com robustez média de $0,708 \pm 0,017$ em validação cruzada 5-fold; a modelagem fuzzy (Gamma, $\gamma = 0,90$) apresentou $AUC = 0,695$ (success/prediction) e $0,707 \pm 0,014$ no 5-fold, indicando consistência entre abordagens e estabilidade do ranqueamento espacial. Em termos de magnitude, o inventário evidencia contrastes marcantes entre núcleos e periferias, com máximos acumulados que atingem aproximadamente -1006 mm no núcleo principal (Mutange) e magnitudes menores, porém persistentes, em setores lagunares, costeiros e de borda urbana, confirmando a existência de subsidências relevantes para além do núcleo minerário historicamente reconhecido.

A integração do inventário com os modelos FR e Lógica *Fuzzy* demonstrou que a distribuição espacial da subsidência resulta da superposição de múltiplos controles. A mineração de halita emerge como mecanismo primário, responsável pela formação da bacia de

subsidência e pela concentração das maiores magnitudes de deformação. Contudo, os resultados confirmam que esse mecanismo atua em conjunto com fatores secundários e moduladores associados à compressibilidade de sedimentos holocênicos, recalque urbano, sobrecarga construtiva, arcabouço estrutural e dinâmica hidrogeológica, compondo um quadro em que a subsidência expressa a vulnerabilidade intrínseca de um território urbano costeiro edificado sobre substratos frágeis e intensamente transformado ao longo do tempo.

A comparação entre os modelos FR e Lógica *Fuzzy* revelou abordagens metodológicas distintas, porém complementares. O FR destacou-se pela transparência estatística e pela capacidade de explicitar a contribuição relativa de classes e variáveis, oferecendo base consistente para interpretações explicativas e para a comunicação técnica dos resultados. A Lógica *Fuzzy* mostrou-se particularmente adequada à representação espacial do fenômeno ao produzir superfícies contínuas de suscetibilidade, com transições suaves e maior coerência espacial em zonas de borda e áreas de transição. A convergência entre os padrões mapeados e os desempenhos semelhantes obtidos por ambos os métodos reforça a robustez dos resultados e sugere que a suscetibilidade identificada reflete propriedades reais do território, e não artefatos metodológicos.

Do ponto de vista científico, a principal contribuição desta tese reside na formalização espacial da subsidência urbana como campo contínuo de suscetibilidade, integrando geotecnologias avançadas, estatística espacial e interpretação geográfica do território. Os resultados indicam que inventários InSAR consistentes, quando integrados a modelos multivariados, constituem ferramentas eficazes para compreender processos urbanos complexos, desde que interpretados à luz de limitações conceituais (p.ex., suscetibilidade não é risco) e condicionantes territoriais (p.ex., exposição e vulnerabilidade variam no espaço).

Sob a perspectiva da Geografia, os resultados reforçam que a subsidência não é apenas um fenômeno físico, mas expressão da produção desigual do espaço urbano. As áreas de maior suscetibilidade coincidem, em grande medida, com setores historicamente marcados por intensa urbanização, elevada densidade construtiva e inserção em ambientes geologicamente frágeis, enquanto áreas de menor suscetibilidade correspondem, em geral, a setores menos urbanizados. Essa constatação é central para evitar interpretações simplificadoras, reconhecendo que os mapas produzidos não representam probabilidades absolutas de ocorrência, mas uma hierarquização espacial das condições favoráveis à deformação, útil para priorização e vigilância territorial.

Do ponto de vista da gestão urbana, os resultados indicam que a subsidência em Maceió

deve ser tratada como problema sistêmico, que extrapola perímetros administrativos fixos e demanda políticas integradas de monitoramento, prevenção e planejamento. Embora esta tese não realize uma análise formal de risco, os resultados sugerem que zonas de suscetibilidade moderada podem adquirir relevância crítica quando inseridas em contextos de elevada exposição urbana e fragilidade socioespacial, reforçando a necessidade de integrar suscetibilidade a camadas de uso do solo, densidade construtiva, tipologia edilícia e capacidade institucional.

Por fim, ao tratar Maceió como caso demonstrativo, esta tese contribui para deslocar o debate sobre subsidência urbana da busca por causas únicas para a compreensão do território como sistema dinâmico, no qual processos geológicos, decisões técnicas, práticas urbanas e desigualdades espaciais se articulam. Nesse sentido, o principal legado do trabalho é também metodológico: um protocolo operacional transferível, passível de adaptação a outras cidades brasileiras e internacionais sujeitas a subsidência multicausal, apoiando diagnósticos comparáveis e estratégias preventivas.

Como desdobramentos futuros, recomenda-se a integração direta entre suscetibilidade, exposição e vulnerabilidade para a construção de mapas de risco, bem como a incorporação de análises temporais dinâmicas que permitam avaliar a evolução da suscetibilidade ao longo do tempo. Tais avanços podem contribuir para políticas públicas mais eficazes e para uma gestão territorial orientada não apenas à resposta, mas à prevenção de desastres associados à instabilidade do solo.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do Nordeste Brasileiro.** *Boletim de Geomorfologia*, São Paulo, n. 19, 38 p., 1969.
- ACSELRAD, H. **Ambientalização das lutas sociais: o caso do movimento por justiça ambiental.** *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 103-119, 2010. DOI: 10.1590/S0103-40142010000100010.
- AGRAM, P. S.; SIMONS, M. **A noise model for InSAR time series.** *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 120, n. 4, p. 2752-2772, 2015. DOI: 10.1002/2014JB011271.
- ABIDIN, H. Z.; ANDREAS, H.; GUMILAR, I.; FUKUDA, Y.; POHAN, Y. E.; DEGUCHI, T. **Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development.** *Natural Hazards*, v. 59, n. 3, p. 1753-1771, 2011. DOI: 10.1007/s11069-011-9866-9.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. **Brazilian structural provinces: An introduction.** *Earth-Science Reviews*, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981. DOI: 10.1016/0012-8252(81)90003-9.
- ALVIOLI, M.; MARCHESINI, I.; REICHENBACH, P.; ROSSI, M.; ARDIZZONE, F.; FIORUCCI, F.; GUZZETTI, F. **Automatic delineation of geomorphological slope units with r.slopeunits v1.0 and their optimization: an application to the Italian Alps.** *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 3975-3991, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-3975-2016.
- AMELUNG, F.; GALLOWAY, D. L.; BELL, J. W.; ZEBKER, H. A.; LACZANIAK, R. J. **Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation.** *Geology*, v. 27, n. 6, p. 483-486, 1999. DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<0483:STUADO>2.3.CO;2.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil.** Brasília, DF: ANA, 2007. Base cartográfica SNIRH.
- ANGULO, R. J.; LESSA, G. C.; SOUZA, M. C. **A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline.** *Quaternary Science Reviews*, v. 25, n. 5-6, p. 486-506, 2006. DOI: 10.1016/j.quascirev.2005.03.008.
- ATKINSON, P. M.; TATE, N. J. **Spatial scale problems and geostatistical solutions: a review.** *The Professional Geographer*, v. 52, n. 4, p. 607-623, 2000. DOI: 10.1111/0033-0124.00250.
- AYALEW, L.; YAMAGISHI, H. **The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan.** *Geomorphology*, v. 65, p. 15-31, 2005. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.06.007.
- BAGHERI-GAVKOSH, M. et al. **Land subsidence: A global challenge.** *Science of the Total Environment*, v. 778, p. 146193, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146193.

BAMLER, R.; HARTL, P. **Synthetic aperture radar interferometry**. *Inverse Problems*, v. 14, n. 4, p. R1-R54, 1998. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001.

BAYRAMOV, E.; BUCHROITHNER, M.; KADA, M.; ZHUNISKENOV, Y. **Quantitative assessment of vertical and horizontal deformations derived by 3D and 2D decompositions of InSAR line-of-sight measurements**. *Remote Sensing*, v. 13, n. 13, p. 2579, 2021. DOI: 10.3390/rs13132579.

BECHOR, N. B. D.; ZEBKER, H. A. **Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair**. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 16, art. L16311, 2006. DOI: 10.1029/2006GL026883.

BECK, U. **Risk society: towards a new modernity**. London: SAGE Publications, 1992.

BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. **A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 40, n. 11, p. 2375-2383, 2002. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.

BIANCHINI, S. et al. **Ground Subsidence Susceptibility (GSS) Mapping in Grosseto Plain (Tuscany, Italy) Based on Satellite InSAR Data Using Frequency Ratio and Fuzzy Logic**. *Remote Sensing*, v. 11, n. 17, art. 2015, 2019. DOI: 10.3390/rs11172015.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Oxford: Pergamon Press, 1994.

BONÌ, R. et al. **Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study**. *Engineering Geology*, 2015. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.08.014.

BJERRUM, L. **Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings**. *Géotechnique*, v. 17, n. 2, p. 83-118, 1967. DOI: 10.1680/geot.1967.17.2.83.

DAS, M. B. **Principles of foundation engineering**. 7. ed. S.l.: Cengage Learning, 2010.

BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. **Tectonic history of the Borborema Province**. In: **Tectonic Evolution of South America**. Rio de Janeiro: 31st IGC, 2000. p. 151-182.

BREIMAN, L. **Random forests**. *Machine Learning*, v. 45, p. 5-32, 2001. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

BRENNING, A. **Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation.** *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 5, p. 853-862, 2005. DOI: 10.5194/nhess-5-853-2005.

BRUNORI, C. A.; BILLI, A.; CASSINO, A. et al. **A New Approach for the Assessment of Land Subsidence Hazards in a Hydrothermal Area: The Case Study of the Roma Thermal Baths.** *Remote Sensing*, v. 7, n. 7, p. 8610-8631, 2015. DOI: 10.3390/rs70708610.

BÜRGMANN, R.; HILLEY, G.; FERRETTI, A.; NOVALI, F. **Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis.** *Geology*, v. 34, n. 3, p. 221-224, 2006. DOI: 10.1130/G22064.1.

CABRAL-CANO, E. et al. **Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City.** *Geological Society of America Bulletin*, v. 120, n. 11-12, p. 1556-1566, 2008. DOI: 10.1130/B26001.1.

CARMINATI, E.; MARTINELLI, G.; SEVERI, P. **Influence of glacial cycles and tectonics on natural subsidence of the Po Plain (northern Italy): insights from seismicity.** *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 4, n. 7, 2003. DOI: 10.1029/2002GC000481.

CAVALCANTE, I. B. S.; SILVA, D. F.; BRANDÃO, J. C. C. B. **Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação em Maceió-AL e de suas causas climáticas.** *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, v. 49, n. 4, e123971, 2023. DOI: 10.22456/1807-9806.123971.

CAVALCANTE, B. S. et al. **Variabilidade pluviométrica e implicações hidrogeomorfológicas em Maceió (AL).** *Pesquisas em Geociências*, v. 50, n. 2, 2023. DOI: 10.22456/1807-9806.129717.

CHAUSSARD, E. et al. **Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction.** *Remote Sensing of Environment*, v. 128, p. 150-161, 2013. DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.015.

CHAUSSARD, E.; WITTE, C.; CHATZINAKOS, C.; BOUSQUET, A.; VREUGDENHIL, M. **Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series.** *Remote Sensing of Environment*, v. 143, p. 94-106, 2014. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.038.

CHAUSSARD, E. et al. **Over a century of sinking in Mexico City: No hope for significant elevation and storage capacity recovery.** *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 126, e2020JB020648, 2021. DOI: 10.1029/2020JB020648.

CHEN, C. W.; ZEBKER, H. A. **Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models.** *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 40, n. 8, p. 1709-1719, 2002. DOI: 10.1109/TGRS.2002.802453.

CHEN, C. W.; ZEBKER, H. A. **Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical**

models for cost functions in nonlinear optimization. *Journal of the Optical Society of America A*, v. 18, n. 2, p. 338-351, 2001. DOI: 10.1364/JOSAA.18.000338.

CHEN, H. et al. **Mapping Susceptibility and Risk of Land Subsidence by Integrating InSAR and Hybrid Machine Learning Models: A Case Study in Xi'an, China.** *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 17, p. 5190-5204, 2024. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3522995.

CHOI, J.; OH, H.-J.; LEE, H.-J.; LEE, C.; LEE, S. **Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS.** *Engineering Geology*, v. 124, p. 12-23, 2012. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.09.011.

CHUNG, C.-J. F.; FABBRI, A. G. **Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping.** *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 65, n. 12, p. 1389-1399, 1999.

CHUNG, C.-J. F.; FABBRI, A. G. **Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping.** *Natural Hazards*, v. 30, p. 451-472, 2003. DOI: 10.1023/B:NHAZ.00000007172.62651.2b.

CIGNA, F.; TAPETE, D. **Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico.** *Remote Sensing of Environment*, v. 254, p. 112254, 2021a. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112254.

CIGNA, F.; TAPETE, D. **Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014-2020 Sentinel-1 IW InSAR.** *Remote Sensing of Environment*, v. 253, p. 112161, 2021b. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112161.

COHEN, J. **A coefficient of agreement for nominal scales.** *Educational and Psychological Measurement*, v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960. DOI: 10.1177/001316446002000104.

COLESANTI, C. et al. **Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique.** *Engineering Geology*, v. 68, n. 1-2, p. 3-14, 2003. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00195-3.

COOPER, A. H.; GUTIÉRREZ, F. **Dealing with gypsum karst problems: hazards, environmental issues, and planning.** In: SHRODER, J. F. (ed.). *Treatise on geomorphology: karst geomorphology*. San Diego: Academic Press/Elsevier, 2013. v. 6, p. 451-462. DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00106-8.

COSTA, A. C. S. et al. **Zoneamento e restrição ao uso das águas subterrâneas do sistema aquífero Barreiras/Marituba em Maceió (AL).** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 3, p. 39-49, 2011.

CROSETTO, M. et al. **Persistent scatterer interferometry: A review.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 115, p. 78-89, 2016. DOI:

10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.

CUTTER, S. L. et al. **A place-based model for understanding community resilience to natural disasters.** *Global Environmental Change*, v. 18, n. 4, p. 598-606, 2008.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. **Social vulnerability to environmental hazards.** *Social Science Quarterly*, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003. DOI: 10.1111/1540-6237.8402002.

DANTAS, M. E.; MELLO, L. B.; GÓES, H. **Aspectos geomorfológicos e do histórico de ocupação do bairro.** In: **SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM). Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): Relatórios Técnicos.** Brasília, DF: SGB/CPRM, 2019. v. II, tomo E.

DOKKA, R. K. **Modern-day tectonic subsidence in coastal Louisiana.** *Geology*, v. 34, n. 4, p. 281-284, 2006. DOI: 10.1130/G22264.1.

DORMANN, C. F. et al. **Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance.** *Ecography*, v. 36, n. 1, p. 27-46, 2013. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x.

EMARDSON, T. R.; JOHANSSON, J. M.; HANSSSEN, R. F. **The atmospheric path delay in InSAR observations: a variance component estimation approach.** *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 108, n. B5, 2003. DOI: 10.1029/2002JB001781.

EGHRARI, A.; DELAVAR, M. R.; SAMAREH, H. **Land subsidence susceptibility mapping using fuzzy-based maximum entropy and ensemble models.** *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-129-2023.

ERKENS, G. et al. **Sinking coastal cities.** *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (PIAHS)*, v. 372, p. 189-198, 2015. DOI: 10.5194/piahs-372-189-2015.

EUILLADES, P. A.; EUILLADES, L. D.; ROSELL, P. A.; ROA, Y. L. B. **Subsidence in Maceió, Brazil, characterized by DInSAR and inverse modeling.** *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. IV-3/W2-2020, p. 7-11, 2020. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-3-W2-2020-7-2020.

FARYABI, A.; GHASEMI, Z.; MOHAMMADI, F. **A fuzzy logic approach for land subsidence susceptibility mapping using hydrogeological data.** *Environmental Earth Sciences*, v. 82, n. 9, art. 209, 2023. DOI: 10.1007/s12665-023-10909-z.

FATTAHI, H.; AMELUNG, F. **DEM error correction in InSAR time series.** *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 51, n. 7, p. 4249-4259, 2013. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2227761.

FATTAHI, H.; AMELUNG, F. **InSAR uncertainty due to orbital errors**. *Geophysical Journal International*, v. 202, n. 2, p. 1211-1223, 2015. DOI: 10.1093/gji/ggu276.

FAWCETT, T. **An introduction to ROC analysis**. *Pattern Recognition Letters*, v. 27, n. 8, p. 861-874, 2006. DOI: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.

FEIJÓ, F. J. Bacia de Sergipe-Alagoas. In: **BOLETIM DE GEOLOGIA ESTRATIGRÁFICA DAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1994.

FELL, R. et al. **Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning**. *Engineering Geology*, v. 102, n. 3-4, p. 85-98, 2008. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.03.022.

FERREIRA NETO, J. V. **Recursos hídricos da cidade de Maceió**. In: CORRÊA, D. S.; FERREIRA NETO, J. V.; LUEDEMANN, M. S. (org.). **Desenvolvimento Econômico e Social: Mundo, Brasil e Nordeste**. Maceió, AL: EDUFAL, 2015.

FERREIRA NETO, J. V. et al. **Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas em área do Tabuleiro do Martins, Maceió (AL)**. *Águas Subterrâneas*, São Paulo, 2002.

FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. **Permanent scatterers in SAR interferometry**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39, n. 1, p. 8-20, 2001. DOI: 10.1109/36.898661.

FERRETTI, A.; MONTI-GUARNIERI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F.; MASSONNET, D. **InSAR principles: guidelines for SAR interferometry processing and interpretation (ESA TM-19)**. Noordwijk: ESA Publications, 2007.

FIELD, C. B. et al. (eds.). **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. DOI: 10.1017/CBO9781139177245.

FONTANET, C. P. et al. **The modifiable areal unit problem: an example in breast cancer outcomes**. *Annals of Surgical Oncology*, v. 30, n. 12, p. 6987-6989, 2023. DOI: 10.1245/s10434-023-14140-9.

FUHRMANN, T.; GARTHWAITE, M. C. **Resolving three-dimensional surface motion with InSAR: constraints from multi-geometry data fusion**. *Remote Sensing*, v. 11, n. 3, p. 241, 2019. DOI: 10.3390/rs11030241.

FURST, S. L. et al. **Monitoring surface deformation of deep salt mining in Vauvert (France), combining InSAR and leveling data for multi-source inversion**. *Solid Earth*, v. 12, n. 1, p. 15-31, 2021. DOI: 10.5194/se-12-15-2021.

GHADERPOUR, E. et al. **Ground deformation monitoring via PS-InSAR time series: a**

method based on the stable turning point detection. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 35, p. 101191, 2024. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101191.

GHIGLIA, D. C.; PRITT, M. D. **Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software.** New York: Wiley, 1998.

GHOUSHCHI, S. J.; VAHABZADEH, S.; PAMUCAR, D. **Applying hesitant q-rung orthopair fuzzy sets to evaluate uncertainty in subsidence causes factors.** *Heliyon*, v. 10, n. 8, p. e29415, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29415.

GALLOWAY, D. L.; BURBEY, T. J. **Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction.** *Hydrogeology Journal*, v. 19, n. 8, p. 1459-1486, 2011. DOI: 10.1007/s10040-011-0775-5.

GALLOWAY, D. L. et al. **Preface: Land subsidence processes.** *Hydrogeology Journal*, v. 24, p. 547-550, 2016. DOI: 10.1007/s10040-016-1386-y.

GAMA, W.; FERREIRA NETO, J. V.; ZANELLA, M. E. Z. **Suscetibilidade, vulnerabilidade e exposição a inundações fluviais em ambientes urbanos: o caso do Riacho do Silva (Maceió, Alagoas).** *Sociedade e Território*, v. 35, n. 1, p. 76-99, 2024.

GOLDSTEIN, R. M.; WERNER, C. L. **Radar interferogram filtering for geophysical applications.** *Geophysical Research Letters*, v. 25, n. 21, p. 4035-4038, 1998. DOI: 10.1029/1998GL900033.

GOODCHILD, M. F. **Scale in GIS: an overview.** *Geomorphology*, v. 130, n. 1-2, p. 5-9, 2011. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.10.004.

GUTIÉRREZ, F.; PARISE, M.; DE WAELE, J.; JOURDE, H. **A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst.** *Earth-Science Reviews*, v. 138, p. 61-88, 2014. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.08.002.

GUZZETTI, F.; MONDINI, A. C.; CARDINALI, M.; FIORUCCI, F.; SANTANGELO, M.; CHANG, K.-T. **Landslide inventory maps: new tools for an old problem.** *Earth-Science Reviews*, v. 112, p. 42-66, 2012. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.02.001.

GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; GALLI, M. **Estimating the quality of landslide susceptibility models.** *Geomorphology*, v. 81, n. 1-2, p. 166-184, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.04.007.

HAESBAERT, R. **O mito da desterritorialização: do “fim dos territórios” à multiterritorialidade.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

HAESBAERT, R. **Viver no limite: território e multiterritorialidade em tempos de insegurança e contenção.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014.

HANLEY, J. A.; MCNEIL, B. J. **The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve.** *Radiology*, v. 143, n. 1, p. 29-36, 1982. DOI: 10.1148/radiology.143.1.7063747.

HANSSEN, R. F. **Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis.** Dordrecht: Springer, 2001. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.

HARTWIG, M. E. et al. **The significance of geological structures on the subsidence phenomenon at the Maceió salt dissolution field (Brazil).** *Acta Geotechnica*, v. 18, p. 5551-5573, 2023. DOI: 10.1007/s11440-023-01846-z.

HARTWIG, M. E.; VASSILEVA, M.; GAMA, F. F.; AL-HALBOUNI, D.; MOTAGH, M. **Relatório independente de análise de dados sobre o processo de subsidência em Maceió para atender à solicitação da Defensoria Pública do Estado de Alagoas.** Maceió: Defensoria Pública do Estado de Alagoas (DPE), 2025. 71 p. Relatório técnico.

HARVEY, D. **Spaces of global capitalism: towards a theory of uneven geographical development.** London: Verso, 2006.

HELM, D. C. **One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California: 1. Constant parameters.** *Water Resources Research*, v. 11, n. 3, p. 465-478, 1975. DOI: 10.1029/WR011i003p00465.

HELM, D. C. **One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California: 2. Stress-dependent parameters.** *Water Resources Research*, v. 12, n. 3, p. 375-391, 1976. DOI: 10.1029/WR012i003p00375.

HERRERA-GARCÍA, G. et al. **Mapping the global threat of land subsidence.** *Science*, v. 371, n. 6524, p. 34-36, 2021. DOI: 10.1126/science.abb8549.

HIGGINS, S. A. Review: **Advances in delta-subsidence research using satellite methods.** *Hydrogeology Journal*, v. 24, p. 587-600, 2016. DOI: 10.1007/s10040-015-1330-6.

HOFFMANN, J.; GALLOWAY, D. L.; ZEBKER, H. A. **Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California.** *Water Resources Research*, v. 39, n. 2, art. 1031, 2003. DOI: 10.1029/2001WR001252.

HOLANDA, E. P. T. et al. **O processo de ocupação do solo de Maceió: do Porto de Jaraguá ao Plano Diretor.** *Caderno de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 3, n. 2, p. 11-28, 2016.

HOLZER, T. L.; GALLOWAY, D. L. **Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States.** In: **Land Subsidence.** Boulder: Geological Society of America, 2005. DOI: 10.1130/2005.4016(08).

HOLZER, T. L. **The history of the aquitard-drainage model.** In: BORCHERS, J. W. (ed.).

Land subsidence case studies and current research: proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence. Belmont, CA: Association of Engineering Geologists, 1998. p. 7-12. (Special Publication, n. 8).

HOOPER, A. **A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches.** *Geophysical Research Letters*, v. 35, n. 16, p. L16302, 2008. DOI: 10.1029/2008GL034654.

HSIEH, P. A. **Deformation-induced changes in hydraulic head during ground-water withdrawal.** *Ground Water*, v. 34, n. 6, p. 1082-1089, 1996. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1996.tb02174.x.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Maceió (AL). Cidades e Estados. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

IPCC. Annex II: Glossary. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). ALOS World 3D – 30m (AW3D30): DSM. Tsukuba: JAXA, 2016.

JIA, C.; DU, J.; LI, Z.; DING, Y.; YANG, X.; ZHANG, Y.; LIANG, H. **Unraveling spatial heterogeneity in land subsidence: Insights from SBAS-InSAR and RF-MGWR coupling models.** *Engineering Geology*, v. 357, p. 108334, 2025. DOI: 10.1016/j.enggeo.2025.108334.

JOHNSON, K. S. **Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States.** *Environmental Geology*, v. 48, n. 3, p. 395-409, 2005. DOI: 10.1007/s00254-005-1283-5.

KOLDASBAYEVA, D. et al. **Challenges in data-driven geospatial modeling for environmental research and practice.** *Nature Communications*, v. 15, art. 10700, 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-55240-8.

KAMPES, B. M. **Radar interferometry: persistent scatterer technique.** Dordrecht: Springer, 2006. DOI: 10.1007/978-1-4020-4723-7.

KILLICK, R.; FEARNHEAD, P.; ECKLEY, I. A. **Optimal detection of changepoints with a linear computational cost.** *Journal of the American Statistical Association*, v. 107, n. 500, p. 1590-1598, 2012. DOI: 10.1080/01621459.2012.737745.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics.** New York: John Wiley & Sons, 1969.

LANARI, R. et al. **Space-borne radar interferometry techniques for the generation of deformation time series: An advanced tool for Earth's surface displacement analysis.** *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 42, n. 7, p. 1377-1386, 2004. DOI: 10.1109/TGRS.2004.828196.

LANARI, R.; CASU, F.; MANZO, M. et al. **An overview of the Small Baseline Subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis.** *Pure and Applied Geophysics*, v. 164, n. 4, p. 637-661, 2007. DOI: 10.1007/s00024-007-0192-9.

LEE, S.; PRADHAN, B. **Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models.** *Landslides*, v. 4, n. 1, p. 33-41, 2007. DOI: 10.1007/s10346-006-0047-y.

LI, X.; HE, Y.; HAO, M. et al. **A transferable approach for automatic land subsidence prediction from InSAR time series considering non-stationary spatial effects.** *Science of the Total Environment*, v. 905, p. 167482, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167482.

LI, Z.; LIN, Q.; WU, C.; LIU, K.; HONG, L.; CUI, Z. **Monitoring and driving mechanisms of coastal land subsidence based on integrated remote sensing and machine learning methods.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 146, p. 105047, 2026. DOI: 10.1016/j.jag.2025.105047.

LIMA, I. F. **Maceió, a Cidade Restinga: Contribuição ao Estudo Geomorfológico do Litoral Alagoano.** Maceió: EDUFAL, 1990.

LIMA, T. A. S.; SIMÕES, S. J. C. **Mapeamento e análise das subsidências no Brasil.** *Geo UERJ*, Rio de Janeiro, v. 47, 2025. DOI: 10.12957/geouerj.2025.87736.

LIMA, T. A. S. et al. **Beyond Salt Mining: Urban Subsidence Hotspots Characterization in Maceió (Brazil), 2016–2024.** *Remote Sensing*, v. 17, n. 24, art. 3974, 2025. DOI: 10.3390/rs17243974.

LIU, Z.; NG, A. H.-M.; WANG, H.; CHEN, J.; DU, Z.; GE, L. **Land subsidence modeling and assessment in the West Pearl River Delta from combined InSAR time series, land use and geological data.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 118, p. 103228, 2023. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103228.

MANTOVANI, J. R.; ALCÂNTARA, E.; LIMA, T. A. S.; SIMÕES, S. **An assessment of ground subsidence from rock salt mining in Maceió (Northeast Brazil) from 2019 to 2023 using remotely sensed data.** *Environmental Challenges*, v. 16, p. 100983, 2024. DOI: 10.1016/j.envc.2024.100983.

MALAMUD, B. D.; TURCOTTE, D. L.; GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P. **Landslide inventories and their statistical properties.** *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 29, p. 687-711, 2004. DOI: 10.1002/esp.1064.

MALCZEWSKI, J. **GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature.** *International Journal of Geographical Information Science*, v. 20, n. 7, p. 703-726, 2006. DOI: 10.1080/13658810600661508.

MAPBIOMAS. **MapBiomass Brasil – Uso e Cobertura do Solo (10 m), ano 2023.** São

Paulo: Projeto MapBiomass, 2023.

MARCEAU, D. J. **The scale issue in the social and natural sciences.** *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 4, p. 347-356, 1999. DOI: 10.1080/07038992.1999.10874734.

MABESOONE, J. M.; CASTRO, C. **Desenvolvimento geomorfológico do Nordeste brasileiro.** *Boletim do Núcleo Nordeste da Sociedade Brasileira de Geologia*, Recife, n. 3, p. 49-59, 1975.

MASTRO, P.; SERIO, C.; MASIELLO, G.; PEPE, A. **The Multiple Aperture SAR Interferometry (MAI) technique for the detection of large ground displacement dynamics: an overview.** *Remote Sensing*, v. 12, n. 7, art. 1189, 2020. DOI: 10.3390/rs12071189.

MASSONNET, D.; FEIGL, K. L. **Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface.** *Reviews of Geophysics*, v. 36, n. 4, p. 441-500, 1998. DOI: 10.1029/97RG03139.

MASSEY, D. **For space.** London: SAGE Publications, 2005.

MECKEL, T. A.; TEN BRINK, U. S.; WILLIAMS, S. J. **Current subsidence rates due to compaction of Holocene sediments in southern Louisiana.** *Geophysical Research Letters*, v. 33, p. L11403, 2006. DOI: 10.1029/2006GL026300.

MESA-MINGORANCE, J. L.; ARIZA-LÓPEZ, F. J. **Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs): A Critical Review of Practices of the Past Three Decades.** *Remote Sensing*, v. 12, n. 16, art. 2630, 2020. DOI: 10.3390/rs12162630.

MESRI, G.; GODLEWSKI, P. **Time- and stress-compressibility interrelationship.** *Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE)*, v. 103, n. GT5, 1977. DOI: 10.1061/AJGEB6.0000421.

MINKLEY, W.; LÜDELING, C.; BRÜCKNER, D. et al. **Subsidence and sinkhole risk over a solution mining cavern field in Maceió, Brazil: analysis of the geomechanical processes—Part I.** *Rock Mechanics and Rock Engineering*, [s.l.], 2025. DOI: 10.1007/s00603-025-05149-5.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. **Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications.** *Hydrological Processes*, v. 5, n. 1, p. 3-30, 1991. DOI: 10.1002/hyp.3360050103.

MORISHITA, Y. et al. **LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor.** *Remote*

Sensing, v. 12, n. 3, p. 424, 2020. DOI: 10.3390/rs12030424.

MOTAGH, M. et al. **Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements.** *Engineering Geology*, v. 218, p. 134-151, 2017. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.01.011.

NAVARRO-HERNÁNDEZ, J. C.; PACHECO-MARTÍNEZ, J.; CABRAL-CANO, E. et al. **Fault-controlled land subsidence due to aquifer exploitation in Morelia, Mexico.** *Engineering Geology*, v. 328, p. 107343, 2023. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107343.

NICHOLLS, R. J. et al. **A global analysis of subsidence, relative sea-level rise and coastal flood exposure.** *Nature Climate Change*, v. 11, p. 338-342, 2021. DOI: 10.1038/s41558-021-00993-z.

OH, H.-J.; AHN, S.-C.; CHOI, J.-K.; LEE, S. **Sensitivity analysis for the GIS-based mapping of the ground subsidence hazard near abandoned underground coal mines.** *Environmental Earth Sciences*, v. 64, n. 2, p. 347-358, 2011. DOI: 10.1007/s12665-010-0855-1.

O'BRIEN, R. M. **A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors.** *Qualitative and Quantitative*, v. 41, p. 673-690, 2007. DOI: 10.1007/s11135-006-9018-6.

OPENSHAW, S. **The Modifiable Areal Unit Problem.** Norwich: Geo Books, 1984.

ORLANDI, D.; DÍAZ, E.; TOMÁS, R.; GALATOLO, F. A.; CIMINO, M. G. C. A.; PAGLI, C.; PERILLI, N. **A machine learning approach for mapping susceptibility to land subsidence caused by ground water extraction.** *Applied Computing and Geosciences*, v. 24, p. 100207, 2024. DOI: 10.1016/j.acags.2024.100207.

OSMANOĞLU, B. et al. **Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011. DOI: 10.1016/j.jag.2010.05.009.

PENG, S. S. **Surface subsidence engineering.** Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 1992.

PEPE, A.; LANARI, R. **On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms.** *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 44, n. 9, p. 2374-2383, 2006. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873207.

PIANOSI, F. et al. **Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow.** *Environmental Modelling & Software*, v. 79, p. 214-232, 2016. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.02.008.

PRADHAN, B. **Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches.** *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 38, n. 2, p. 301-320, 2010. DOI: 10.1007/s12524-010-0020-z.

POLAND, J. F.; DAVIS, G. H. **Land subsidence due to withdrawal of fluids**. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1969. (Professional Paper 497).

POLIDORI, L.; EL HAGE, M. **Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review**. *Remote Sensing*, v. 12, n. 21, art. 3522, 2020. DOI: 10.3390/rs12213522.

RAFFESTIN, C. **Por uma geografia do poder**. São Paulo: Ática, 1993.

PETSCHKO, H.; BELL, R.; GLADE, T.; HOURCADE, J.-P. **Assessing the quality of landslide susceptibility maps—case study from Lower Austria**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 14, p. 95-118, 2014. DOI: 10.5194/nhess-14-95-2014.

RANJGAR, B. et al. **Land Subsidence Susceptibility Mapping Using Persistent Scatterer SAR Interferometry Technique and Optimized Hybrid Machine Learning Algorithms**. *Remote Sensing*, v. 13, n. 7, art. 1326, 2021. DOI: 10.3390/rs13071326.

RASPINI, F. et al. **Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis**. *Earth-Science Reviews*, v. 235, p. 104239, 2022. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.104239.

REICHENBACH, P.; ROSSI, M.; MALAMUD, B. D.; MIHALIĆ ARBANAS, S.; GUZZETTI, F. **Landslide susceptibility mapping and assessment: a review**. *Earth-Science Reviews*, v. 180, p. 60-91, 2018. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.03.001.

REINOSCH, E. et al. **Seasonal ice-flow variability in Northwest Greenland inferred from Sentinel-1 InSAR**. *The Cryosphere*, v. 14, p. 1633-1651, 2020. DOI: 10.5194/tc-14-1633-2020.

RIEL, B. et al. **Detecting transient signals in geodetic time series using sparse estimation techniques**. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 119, n. 6, p. 5140-5160, 2014. DOI: 10.1002/2014JB011077.

RILEY, F. S. Mechanics of aquifer systems—**The scientific legacy of Joseph F. Poland**. In: BORCHERS, J. W. (ed.). **Land subsidence case studies and current research: proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence**. Belmont, CA: Association of Engineering Geologists, 1998. p. 13-27. (Special Publication, n. 8).

ROBERTS, D. R.; BAHN, V.; CIUTI, S.; BOYCE, M. S.; ELITH, J.; GUILLERA-ARROITA, G. et al. **Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure**. *Ecography*, v. 40, p. 913-929, 2017. DOI: 10.1111/ecog.02881.

ROSEN, P. A. et al. **Synthetic aperture radar interferometry**. *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 3, p. 333-382, 2000. DOI: 10.1109/5.838084.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. **Marine influence in the Barreiras Formation, State of Alagoas, northeastern Brazil**. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 81, n. 4, p. 741-755, 2009. DOI: 10.1590/S0001-37652009000400011.

ROUYET, L. et al. **Seasonal Changes in Surface Deformation Inferred from InSAR Time Series Analysis in the Eastern Pyrénées, France.** *Remote Sensing*, v. 13, p. 2977, 2021. DOI: 10.3390/rs13152977.

RUCH, J.; ANDERSSOHN, J.; WALTER, T. R.; MOTAGH, M. **Caldera-scale inflation of the Lazufre volcanic area, South America: Evidence from InSAR.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 174, n. 4, p. 337-344, 2008. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.009.

RYGUS, T. et al. **A Clustering Approach for Fully Exploiting the Temporal Behaviour of InSAR Time Series.** *Remote Sensing*, v. 15, p. 3776, 2023. DOI: 10.3390/rs15153776.

SAITO, T.; REHMSMEIER, M. **The precision-recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets.** *PLOS ONE*, v. 10, n. 3, p. e0118432, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0118432.

SAMSONOV, S.; BARYAKH, A. **Estimation of deformation intensity above a flooded potash mine near Berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR interferometry.** *Remote Sensing*, v. 12, n. 19, art. 3215, 2020. DOI: 10.3390/rs12193215.

SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção.** São Paulo: Hucitec, 1996.

SANTOS, J. O. et al. **Simulação do rebaixamento no aquífero Barreiras devido ao bombeamento de poços na Região Metropolitana de Maceió (AL).** *Águas Subterrâneas*, São Paulo, 2000.

SANTOS, R. J. Q.; LIMA, R. C. A.; FERREIRA NETO, J. V. **A geomorfologia do tabuleiro como consequência do neotectonismo.** In: ARAÚJO, L. M. (org.). *Geografia: espaço, tempo e planejamento*. Maceió, AL: EDUFAL, 2004. p. 255-268.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM). **Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): Ação emergencial no Bairro Pinheiro. Volume I: Relatório Síntese dos Resultados n. 1.** Brasília: SGB/CPRM, 29 abr. 2019a.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM). **Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): Ação emergencial no Bairro Pinheiro. Tomo E – Relatório Completo.** Brasília: SGB/CPRM, 29 abr. 2019b.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM). **Nota Técnica nº 04/SGB/2022: monitoramento da instabilidade do terreno em Maceió - AL.** Brasília: SGB/CPRM, 2022. Disponível em: <https://defensoria.al.def.br> Acesso em: 16 dez. 2025.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM). **Carta geomorfológica: município de Maceió (AL).** Escala 1:60.000. Rio de Janeiro: SGB, 2024.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM). **Carta geológica: folha SC.25-V-C-IV, Maceió**. Recife: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2023.

SCHALLER, H. **Revisão estratigráfica da bacia de Sergipe/Alagoas**. *Boletim Técnico da Petrobras*, v. 12, n. 1, p. 21-86, 1969.

SYVITSKI, J. P. M. et al. **Sinking deltas due to human activities**. *Nature Geoscience*, v. 2, p. 681-686, 2009. DOI: 10.1038/ngeo629.

SKEMPTON, A. W.; MACDONALD, D. H. **The allowable settlements of buildings**. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 5, n. 6, p. 727-768, 1956. DOI: 10.1680/ipeds.1956.12202.

TEIXEIRA, A. C.; BAKON, M.; PERISSIN, D.; SOUSA, J. J. **InSAR Analysis of Partially Coherent Targets in a Subsidence Deformation: A Case Study of Maceió**. *Remote Sensing*, v. 16, n. 20, art. 3806, 2024. DOI: 10.3390/rs16203806.

TERZAGHI, K. **Theory of Consolidation**. In: **Theoretical Soil Mechanics**. 1943. DOI: 10.1002/9780470172766.ch13.

TOLEDO, P. H. O. **Zoneamento de áreas de risco geológico para o município de Maceió-AL**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

TOMÁS, R. et al. **Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain**. *Environmental Earth Sciences*, v. 71, p. 163-181, 2014. DOI: 10.1007/s12665-013-2422-z.

TORRES, R.; SNOEIJ, P.; GEUDTNER, D. et al. **GMES Sentinel-1 mission**. *Remote Sensing of Environment*, v. 120, p. 9-24, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.028.

TOSI, L.; TEATINI, P.; STROZZI, T. **Natural versus anthropogenic subsidence of Venice**. *Scientific Reports*, v. 3, art. 2710, 2013. DOI: 10.1038/srep02710.

TOSI, L. et al. **Land Subsidence in Coastal Environments: Knowledge Advance in the Venice Coastland by TerraSAR-X PSI**. *Remote Sensing*, v. 10, n. 8, p. 1191, 2018. DOI: 10.3390/rs10081191.

TÖRNQVIST, T. E. et al. **Mississippi Delta subsidence primarily caused by compaction of Holocene strata**. *Nature Geoscience*, v. 1, p. 173-176, 2008. DOI: 10.1038/ngeo129.

TOUZI, R.; LOPES, A.; BRUNIQUEL, J. **Coherence estimation for SAR imagery**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 37, n. 1, p. 135-149, 1999. DOI: 10.1109/36.739146.

TREVISANI, S. et al. **Global digital elevation models for terrain morphology analysis in mountain environments: insights on Copernicus GLO-30 and ALOS AW3D30 for a large Alpine area**. *Environmental Earth Sciences*, 2023. DOI: 10.1007/s12665-023-10882-7.

TUAN, Y.-F. **Space and place: the perspective of experience**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1977.

TZAMPOGLOU, P. et al. **Selected Worldwide Cases of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal**. *Water*, 2023. DOI: 10.3390/w15061094.

UNDRR. Disaster Risk Reduction Terminology. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2017.

USHA, S.; ALABDULKREEM, E.; ALRUWAIS, N.; ALMUKADI, W. S. **Monitoring land subsidence using Sentinel-1A, persistent scatterer InSAR, and machine learning techniques**. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 155, p. e105433, 2025. DOI: 10.1016/j.jsames.2025.105433.

URGILEZ-VINUEZA, S. et al. **Automated detection of changes in displacement rates in InSAR time series for landslide monitoring**. *Landslides*, 2022. DOI: 10.1007/s10346-022-01913-8.

VALAVI, R.; ELITH, J.; LAHOZ-MONFORT, J. J.; GUILLERA-ARROITA, G. **blockCV: an R package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models**. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 10, n. 2, p. 225-232, 2019. DOI: 10.1111/2041-210X.13107.

VAN WESTEN, C. J.; CASTELLANOS, E.; KURIAN, N. P. **Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment**. *Engineering Geology*, v. 102, n. 3-4, p. 112-131, 2008. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.03.010.

VASCONCELOS, D. A. L.; ARAÚJO, L. M.; RAMOS, S. P. **Turismo, playa y territorio: el destino Maceió, Brasil**. *PASOS: Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, v. 17, n. 4, p. 907-924, 2019.

VASSILEVA, M. et al. **A decade-long silent ground subsidence hazard culminating in a metropolitan disaster in Maceió, Brazil**. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, art. 7704, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-87033-0.

WALTHAM, T.; BELL, F. G.; CULSHAW, M. G. **Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction**. Berlin: Springer, 2005. DOI: 10.1007/b138363.

WANG, H.; JIA, C.; DING, P.; FENG, K.; YANG, X.; ZHU, X. **Analysis and Prediction of Regional Land Subsidence with InSAR Technology and Machine Learning Algorithm**. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 27, n. 2, p. 782-793, 2023. DOI: 10.1007/s12205-022-1067-4.

WIENS, J. A. **Spatial scaling in ecology**. *Functional Ecology*, v. 3, n. 4, p. 385-397, 1989. DOI: 10.2307/2389612.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain Analysis: Principles and Applications**.

New York: Wiley, 2000.

WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters**. 2. ed. London: Routledge, 2004.

WHITTAKER, B. N.; REDDISH, D. J. **Subsidence: occurrence, prediction and control**. Amsterdam: Elsevier, 1989. (Developments in Geotechnical Engineering, v. 56).

WRIGHT, T. J.; PARSONS, B.; LU, Z. **Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR**. *Geophysical Research Letters*, v. 31, p. L01607, 2004. DOI: 10.1029/2003GL018827.

WU, Y. et al. **Subsidence in coastal cities throughout the world observed by InSAR**. *Geophysical Research Letters*, v. 49, n. 5, p. e2022GL098477, 2022. DOI: 10.1029/2022GL098477.

YAGÜE-MARTÍNEZ, N.; PRATS-IRAOLA, P.; RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, I. et al. **Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 54, n. 4, p. 2220-2234, 2016. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2497902.

YILMAZ, I. **Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat–Turkey)**. *Computers & Geosciences*, v. 35, n. 6, p. 1125-1138, 2009. DOI: 10.1016/j.cageo.2008.08.007.

YU, C.; PENNA, N. T.; LI, Z. **Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations**. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018. DOI: 10.1029/2017JB015305.

YUNJUN, Z.; FATTAHI, H.; AMELUNG, F. **MintPy: A small baseline InSAR time series analysis package**. *Computers & Geosciences*, v. 133, p. 104331, 2019. DOI: 10.1016/j.cageo.2019.104331.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets**. *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

ZEBKER, H. A.; VILLASENOR, J. **Decorrelation in interferometric radar echoes**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 30, n. 5, p. 950-959, 1992. DOI: 10.1109/36.175330.

ZHU, B.; LI, J.; TANG, W. **Topographically correlated tropospheric delays in SAR interferometry: a review and new insights**. *Remote Sensing*, v. 9, n. 8, p. 765, 2017. DOI: 10.3390/rs9080765.

ZIMMERMANN, H.-J. **Fuzzy set theory—and its applications**. 4. ed. Boston: Springer, 2001.