



## Avaliação da adequação geotécnica para fins de ocupação urbana do setor habitacional Sol Nascente – DF por meio de análise multicriterial

Brenda Amorim Beserra<sup>1</sup>, George Fernandes Azevedo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Engenheira Civil pela Universidade Federal do Maranhão, e-mail: [brenda.ambz@gmail.com](mailto:brenda.ambz@gmail.com).

<sup>2</sup>Engenheiro Civil, Doutor em Geotecnia, Professor Adjunto do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, e-mail: [gf.azevedo@ufma.br](mailto:gf.azevedo@ufma.br).

Artigo recebido em 07/08/2023 e aceito em 23/05/2024

### RESUMO

A frequência de eventos relacionados a deslizamentos em encostas e inundações em cidades brasileiras tem aumentado nos últimos anos e dentre as principais causas estão o crescimento irregular das cidades e a ocupação de áreas suscetíveis a tais processos. Em face desse assentamento irregular, torna-se imprescindível a avaliação das condições de aptidão à ocupação para garantir segurança à população. Nesse contexto, o presente artigo apresenta a carta de aptidão geotécnica do Setor Habitacional Sol Nascente, localizado na Região Administrativa de Sol Nascente/Pôr do Sol – DF, elaborada através da aplicação do método de análise multicriterial AHP (Processo de Análise Hierárquica) em ambientes SIG, visando avaliar a adequação geotécnica para fins de urbanização da região por meio da delimitação de áreas suscetíveis a processos de escorregamentos de massa e inundações e Áreas de Proteção Permanente (APP). Ao final, obteve-se como resultado duas cartas de aptidão geotécnica que permitiram corroborar a importância do gestor da decisão durante a aplicação do método AHP. A partir dos resultados observados concluiu-se que a maioria das áreas de baixa aptidão à ocupação coincide com as regiões mais próximas aos canais de drenagem, sugerindo maior suscetibilidade aos eventos considerados nessas regiões. Constatou-se ainda que, quando se considera a suscetibilidade à inundação como fator mais influente do nível de aptidão à ocupação, a região de estudo apresentou muitas áreas de baixa aptidão, com 33,2% do território do Setor Habitacional Sol Nascente tendo sido delimitado como área de suscetibilidade.

Palavras-chave — Análise multicriterial, geoprocessamento, geotecnologias, aptidão à ocupação urbana.

## Evaluation of geotechnical adequacy for urban occupation purposes of the Sol Nascente housing sector – DF through multicriterial analysis

### ABSTRACT

The frequency of events related to landslides and floods in Brazilian cities has increased in recent years and among the main causes are the irregular growth of cities and the occupation of areas susceptible to such processes. In view of this irregular settlement, it is essential to evaluate the conditions of aptitude to the occupation to ensure public security to the population. In this context, this article presents the geotechnical aptitude chart of the Sol Nascente Housing Sector, located in the Administrative Region of Sol Nascente/Pôr do Sol – DF, elaborated through the application of the multicriterial analysis method AHP (Analytic Hierarchy Process) in GIS environments, aiming to evaluate the geotechnical adequacy for the purpose of urbanization of the region through the delimitation of areas susceptible to mass slipping processes and floods and Permanent Protection Areas (PPA). In the end, two geotechnical aptitude charts were obtained as a result, which allowed us to corroborate the importance of the decision manager during the application of the AHP method. From the results observed, it was concluded that most areas of low aptitude to occupation coincide with the regions closest to the drainage channels, suggesting greater susceptibility to the events considered in these regions. It was also found that, when considering the susceptibility to flooding as the most influential factor of the level of aptitude to occupation, the study region presented many areas of low aptitude, with 33.2% of the territory of the Sol Nascente Housing Sector have been delimited as a susceptibility area.

Keywords — Multicriterial analysis, geoprocessing, geotechnologies, fitness to urban occupation.

## Introdução

A ocupação urbana realizada de forma irregular é a raiz de diversos problemas enfrentados pelas cidades brasileiras. Em relação ao processo de crescimento das zonas urbanas, Schorn e Vieira (2023) expõem que a população de baixa renda apresenta como tendência se instalar em áreas caracterizadas pela ausência de infraestrutura, já que estas são economicamente mais acessíveis, mas frágeis do ponto de vista ambiental. Muitas vezes, estas áreas situam-se em mangues, margens de corpos hídricos, dunas e vertentes com grande inclinação (Reis et al., 2020). Consta-se que a frequência de eventos relacionados a deslizamentos em encostas, inundações, enxurradas e erosões em cidades brasileiras tem aumentado nos últimos anos, os quais resultam em irreparáveis perdas humanas, além de prejuízos econômicos significativos para as populações envolvidas. Estes eventos de riscos ambientais tomam uma conotação mais grave em países em desenvolvimento (Silva e Neto, 2018). Dentre as principais causas de ocorrência desses eventos estão o crescimento irregular das cidades e a ocupação de áreas suscetíveis a tais processos (Bispo et al., 2019). Neste sentido, Coelho e Nunes (2020) destacam que a ocupação desordenada, juntamente com o crescimento da população e mudanças no uso do solo, potencializa os desastres naturais em áreas urbanas.

O direito à moradia é garantido pelo artigo 6º da Constituição Federal. No entanto, para que este seja exercido de maneira adequada e digna é imprescindível que sejam observados os requisitos mínimos urbanísticos e socioambientais. Diante disso, o planejamento urbano e socioambiental é fundamental para conhecer e organizar o solo, propondo diretrizes para seu uso e ocupação de modo a garantir a segurança pública.

Apesar da ocupação urbana de Brasília ter se dado de maneira diferenciada quando comparada com outras cidades brasileiras, visto que houve um planejamento prévio a fim de garantir a infraestrutura demandada para a população prevista, esse fato não impossibilitou a ocupação desordenada das cidades no entorno da capital do Distrito Federal. O rápido processo de construção de Brasília exigiu uma grande mobilização de frentes de trabalho, atraindo um grande contingente de migrantes para o Distrito Federal, contexto no qual se insere a criação das Regiões Administrativas, surgidas com o intuito de atender o crescimento populacional decorrente dos grandes fluxos migratórios, de maneira a impedir que se fossem criados loteamentos irregulares no Plano Piloto (Pessoa, 2009). A partir de então, houve a

segregação física e social das classes no Distrito Federal marcada pela nítida diferença entre as condições de moradia do Plano Piloto e as demais regiões, onde a falta de oferta de moradia e o controle da migração, tendo sido posto de lado, resultou no surgimento de inúmeras favelas nos núcleos urbanos (Canabrava, 2017).

Em face desse processo de ocupação ligado ao assentamento irregular no entorno de Brasília, a avaliação das condições de aptidão à ocupação se torna imprescindível, sendo de responsabilidade da administração pública a regularização dessas regiões e a garantia de segurança à população, bem como a fiscalização para o cumprimento das leis ambientais de delimitação e preservação de Áreas de Proteção Permanente (APP). Para tanto, é necessária a definição e avaliação de aspectos ambientais determinantes do nível de ocupação permitido para determinada região, o que é possível através da integração de dados e informações básicas sobre as características geotécnicas dos terrenos em uma determinada área e suas possíveis interações com as intervenções humanas relacionadas ao processo de uso e ocupação do solo. Uma importante ferramenta do planejamento urbano para realização dessas avaliações são as chamadas cartas geotécnicas (IPT, 2015).

As cartas geotécnicas são apresentadas na forma de documento cartográfico elaborado através de trabalhos de mapeamento. Nesse documento estão sintetizados o meio físico e seus processos geodinâmicos atuantes, configurando-se em recomendações sobre medidas que devem ou não ser tomadas para que eventuais intervenções no terreno sejam adequadas às suas características geotécnicas, evitando, dessa forma, as graves consequências da ocupação irregular de áreas inaptas (IPT, 2015).

Embora exista uma diversidade de termos para denominar os diferentes tipos de cartas geotécnicas, são importantes instrumentos do planejamento urbano as cartas de suscetibilidade e cartas de aptidão à ocupação urbana. As cartas de suscetibilidade têm a finalidade de apontar áreas propícias à ocorrência de eventos ambientais que ofereçam ameaça à população e são úteis não só para fins de ocupação urbana, como também para outros usos. As cartas de aptidão à urbanização, por sua vez, devem ser entendidas como uma abordagem integrada dos diagnósticos dos parâmetros físico-ambiental, jurídico-legal e socioeconômico-organizativo de áreas destinadas à expansão urbana (Souza e Sobreira, 2015; IPT, 2015). Como exemplo de aplicação, pode-se citar o trabalho de Ribeiro e Dias (2021), onde a carta de aptidão urbana para o município de Cataguases

(MG) foi gerada a partir do mapeamento geológico-geotécnico e da geomorfologia do terreno. Já Rocha et al. (2021) estabeleceram uma confrontação entre a metodologia empregada para a confecção da carta de aptidão à urbanização para o município de Nova Friburgo (RJ) e os métodos aplicados para a geração das cartas de susceptibilidade e perigo. Destaca-se também a geração de trabalhos voltados para a definição da susceptibilidade de ocorrência de movimentos de massa (Ferreira e Azevedo, 2022; Cruz, et al., 2023), os quais contribuem nas análises de risco ambiental.

As cartas geotécnicas, sendo definidas através do cruzamento de planos de informação geológico-geotécnicos utilizando ferramentas de geoprocessamento em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica), são imprescindíveis na avaliação de ocorrências associadas à susceptibilidade de eventos geodinâmicos (Oliveira et al., 2019). Conforme Ramos et al. (2024), recursos relacionados a geotecnologias, como o SIG, permitem que estudos voltados para a fragilidade ambiental sejam empreendidos de maneira mais criteriosa.

Em análises ambientais realizadas por meio de softwares de georreferenciamento, o processo de tomada de decisão envolve diversos critérios, vários agentes de decisão e muitas vezes envolve múltiplos objetivos conflitantes entre si, tornando-o complexo e dependente de um tratamento qualificado. Isso requer a utilização de métodos de apoio à decisão eficientes, dentre os quais, destaca-se como uma das técnicas mais comumente empregadas a análise multicriterial. O uso de modelos de tomada de decisão tem um papel importante no processo de gestão de informações espaciais e governança que, por sua vez, são essenciais no planejamento ambiental, principalmente de áreas protegidas (Medeiros et al., 2022). Diante da necessidade de avaliar uma alternativa através de vários critérios para assim tomar uma decisão, a análise multicriterial busca elencar as alternativas mediante o levantamento de fatores de relevância, propiciando alcançar dentre as opções a alternativa mais segura para os problemas encarados. Silva et al. (2020) destacam que o método de análise multicriterial permite o uso de critérios específicos para cada situação analisada, sendo aplicado principalmente em problemas ambientais, como risco de deslizamentos, vulnerabilidade socioambiental e susceptibilidade de erosão do solo.

Para Santos e Nóbrega (2017), a problemática da tomada de decisão está associada ao número crescente de critérios conflitantes, de modo que os decisores necessitam selecionar, ordenar, classificar e descrever detalhadamente as

alternativas a serem selecionadas, considerando a multiplicidade de critérios.

São muitos os métodos de análise multicritério que podem ser propostos de acordo com as situações identificadas e a escolha destes deve considerar a aplicabilidade do método ao problema em questão e, ainda, as preferências dos decisores envolvidos. Apesar dessa variedade de métodos, a análise multicritério apresenta uma modelagem robusta e transparente, apresentando premissas e preferências dos decisores quanto aos objetivos considerados durante o processo decisório (Santos e Nóbrega, 2017).

Em virtude de sua boa integração com os SIG em relação ao cruzamento de informações para priorização de áreas, um importante método de análise multicritério é o Processo de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), adotado nesta pesquisa para atingir o objetivo central proposto, cujo principal fundamento consiste em definir uma escala de importância entre os fatores ambientais analisados, colocando-os em uma matriz de combinação pareada a fim de estabelecer uma hierarquia de importância entre os elementos (Araújo, 2018).

O processo de análise AHP foi proposto por Saaty (1977) e considera que os diferentes fatores intervenientes são comparados dois-a-dois, atribuindo a esse relacionamento um valor de importância relativa conforme uma escala pré-definida. Os valores atribuídos são então inseridos em uma matriz quadrada, cujas linhas e colunas contêm os critérios comparados. Ao final do método, obtém-se valores de pesos que representam o grau de influência dos critérios na alternativa analisada, e o modelo informa ainda uma razão de consistência que vai indicar se as notas atribuídas na etapa de comparação são coerentes: aceitam-se os pesos obtidos caso a razão de consistência seja inferior a 0,10 (Santos e Nóbrega, 2017).

Com base no que foi exposto e tendo em vista seu processo de ocupação urbana dado de maneira irregular e desordenada, o Setor Habitacional Sol Nascente foi a região de interesse escolhida como objeto de estudo do presente artigo. Entende-se que há a necessidade de se produzir estudos geológicos-geotécnicos a fim de direcionar os processos de urbanização de forma que estes se desenvolvam de maneira consciente através do mapeamento das áreas aptas a tais processos, garantindo a segurança da população bem como a prevenção de perdas econômicas decorrentes de possíveis acidentes ambientais. Nesse sentido, Ikiriko e Enwin (2023) destacam a importância da investigação geotécnica na mitigação de riscos relacionados ao desenvolvimento urbano, como

recalques, instabilidade do solo e contaminação do lençol freático, fornecendo informações essenciais sobre a condição do subsolo e da água subterrânea. Tais dados tem um papel crítico na redução dos riscos de contaminação do ambiente e para a saúde humana.

Ao longo do último século, a urbanização vem aumentando no mundo todo, acompanhado de um rápido aumento populacional, o que leva a sérios problemas ambientais e ecológicos (Khan et al., 2021; Luan et al., 2021). Campos et al. (2021) afirmam que inúmeras mudanças ambientais são provocadas por vulnerabilidades ambientais atreladas a ações antrópicas, como o uso do solo de maneira inadequada e retirada da sua cobertura natural. Neste contexto, Souissi et al. (2023) destacam que cidades que apresentam um rápido crescimento urbano e demográfico demandam do desenvolvimento de novas habitações e infraestruturas em extensas áreas. No sentido de promover um crescimento urbano sustentável, Tan et al. (2021) estabelecem que fatores de diferentes naturezas, como ambientais, geotécnicos, geológicos e hidrológicos e hidrogeológicos devem ser avaliados.

Para enfrentar tais aspectos problemáticos, os investigadores buscam criar variadas metodologias voltadas para regular o desenvolvimento urbano, ao mesmo tempo que buscam combater o crescimento urbano desordenado e manter a sustentabilidade. Desta forma, o objetivo a ser alcançado corresponde em determinar quais seriam as melhores localizações geográficas capazes de permitir o desenvolvimento urbano equilibrado e, de forma paralela, estabelecer as localizações de regiões naturais que devem ser preservadas (Schaefer e Thinh, 2019). Lira et al. (2022) afirmam que uma ferramenta de destaque para a produção sustentável e conservação ambiental consiste na avaliação de fragilidade ambiental, o que auxilia gestores neste processo.

Fica claro que um planejamento eficaz da cobertura do solo é essencial para a identificação dos melhores locais para o crescimento urbano sustentável (Masoudi et al., 2021). Um planejamento e gestão eficazes do uso do solo é alcançado a partir do processo de decisão representado pela análise e avaliação da adequação dos solos urbanos (Fawad et al. 2022, Sotiropoulou e Vavatsikos, 2023).

Conforme Yang e Khan (2022), os métodos comumente usados e mais eficazes, dentre os vários desenvolvidos, consistem na análise de adequação do solo e a previsão do crescimento urbano futuro. Esses métodos representam uma ferramenta informativa eficaz para apoiar os formuladores de

políticas e planejadores no desenvolvimento de planos diretores ideais, mantendo a sustentabilidade e garantindo a equidade social entre os residentes (Al-Ghorayeb et al., 2023).

Diante do exposto, observa-se que a necessidade de integração entre diferentes condicionantes ambientais pertinentes para a geração de um cenário correspondente a aptidão à ocupação, definindo uma abordagem preventiva e de planejamento. Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo central a geração de cenários de aptidão geotécnica com aplicação de métodos de análise multicriterial visando avaliar a adequação geotécnica para fins de urbanização do Setor Habitacional Sol Nascente, localizado na Região Administrativa de Sol Nascente/Pôr do Sol – DF. Como hipótese, busca-se estabelecer se a configuração de aptidão à urbanização obtida para a área de estudo é substancialmente influenciada pela categorização hierárquica imposta às variáveis ambientais que compõem as análises, ao se propor diferentes cenários de importância relativa.

## **Materiais e métodos**

Nesta seção pretende-se descrever a metodologia utilizada na realização das análises pertinentes à geração da Carta de Aptidão Geotécnica para fins de ocupação urbana. Em se tratando de ferramentas computacionais utilizadas para tratamento e processamento das informações obtidas foram utilizadas as plataformas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) QGIS 3.10 e SPRING 5.4 (Câmara et al., 2001), além da extensão desse último voltada para consulta e manipulação de dados em formato matricial, a linguagem de programação e álgebra de mapas disponível no software (linguagem LEGAL).

A metodologia ainda fez uso de lógica *Fuzzy* para as etapas de normalização de critérios e da técnica de AHP como ferramenta de apoio à tomada de decisão pertinente aos procedimentos de análise espacial.

A área escolhida para o estudo refere-se ao Setor Habitacional Sol Nascente, localidade pertencente à Região Administrativa de Sol Nascente/Pôr do Sol, RA XXXII do Distrito Federal (Figura 1).

O Setor Habitacional Sol Nascente está situado nas bordas de Ceilândia, ao sul, localizado a apenas 30 quilômetros do Palácio do Planalto, e confronta ao norte com as quadras QNR, QNQ e QNP de Ceilândia. Encontra-se ainda entre as rodovias BR 070, DF 180 e DF 085 (EPTG), e ocupa os platôs formados pelos vales dos córregos afluentes do Rio Melchior (Godoy, 2013).

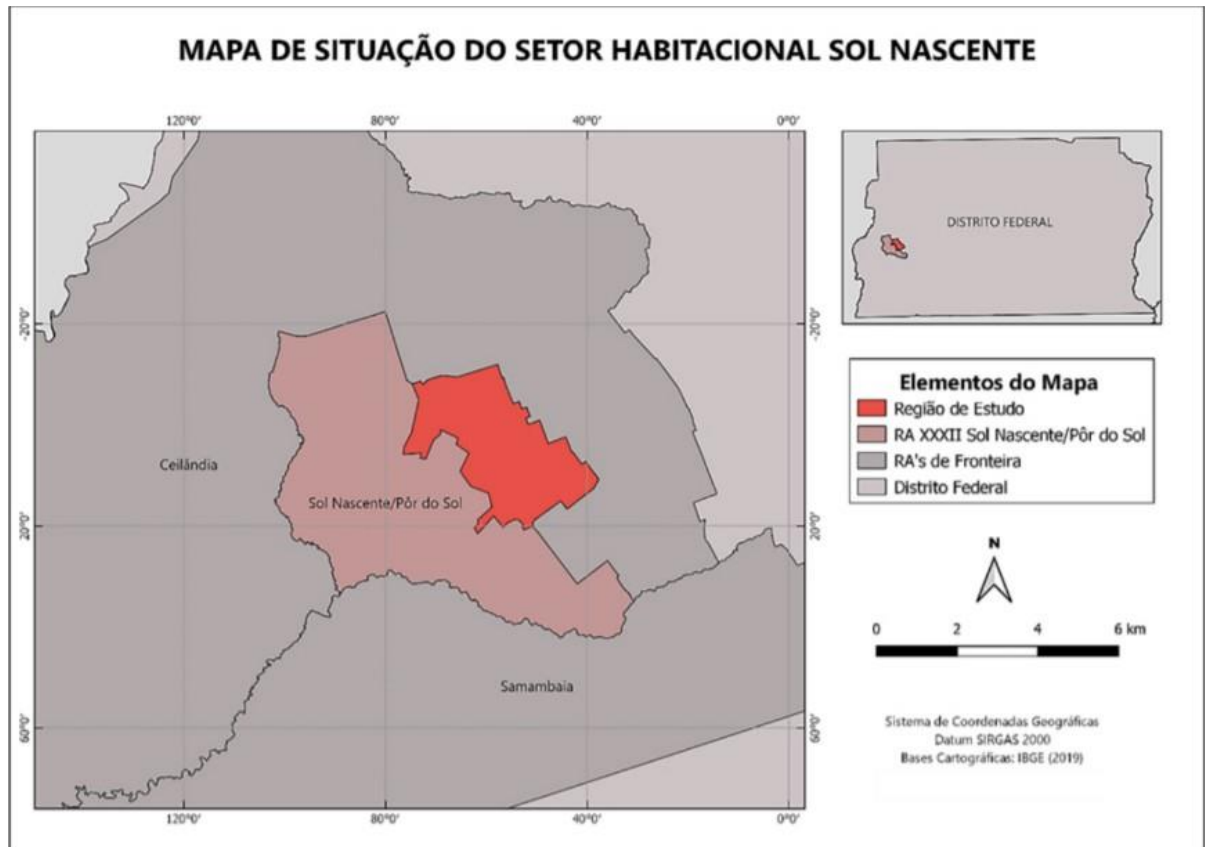


Figura 1. Mapa de situação da região de estudo.

A região escolhida para estudo, conhecida como “Condomínio Sol Nascente”, totaliza aproximadamente 934,456 hectares (9,35 km<sup>2</sup>) e corresponde a um terreno de concessão de uso que foi fracionado de forma irregular a partir da década de 1990 e ocupada de maneira intensificada a partir dos anos 2000 (Canabrava, 2017). Nesse contexto, onde os processos de ocupação do solo se davam basicamente por meio de invasões, a atual Área de Regularização de Interesse Social (ARIS) Sol Nascente é marcada pela precariedade ou inexistência de infraestrutura básica – poucos domicílios contam com ruas com rede de esgoto, coleta de água pluvial, ruas asfaltadas ou mesmo serviço de coleta seletiva (CODEPLAN, 2019), o que, aliado à sua grande densidade demográfica, contribuiu para ser reconhecida como a segunda maior favela do país, de acordo com dados divulgados pelo IBGE (2019) em seu relatório de aglomerados subnormais.

De acordo com Lima (2016), ARIS se trata de um instrumento jurídico, urbanístico, social e ambiental previsto na legislação que visam a regularização de assentamentos informais e a

titulação de seus ocupantes, de modo a garantir o direito social à moradia ao meio ambiente ecologicamente equilibrado.

O Setor Habitacional Sol Nascente possui aproximadamente 25.441 unidades domiciliares (IBGE, 2019) e, juntamente com o Setor Habitacional Pôr do Sol, ambos condomínios urbanos irregulares em estágio avançado de consolidação, totaliza cerca de 91.066 habitantes, conforme dados divulgados pela CODEPLAN (2019), números que aumentam significativamente ao longo dos anos, tendo a Região Administrativa Sol Nascente/Pôr do Sol apresentado taxas de crescimento populacional consideráveis até o ano de 2010, de modo que atualmente estas se aproximam das apresentadas pelo Distrito Federal como um todo, valores referentes a 1,32% ao ano registrado entre 2015 e 2020.

De acordo com Canabrava (2017), a região de estudo surgiu em uma área considerada de fragilidade ambiental, possuindo Áreas de Preservação Permanente (APP), rupturas de relevo e solos hidro mórficos. Os limites da área de estudo encontram-se na Figura 2.

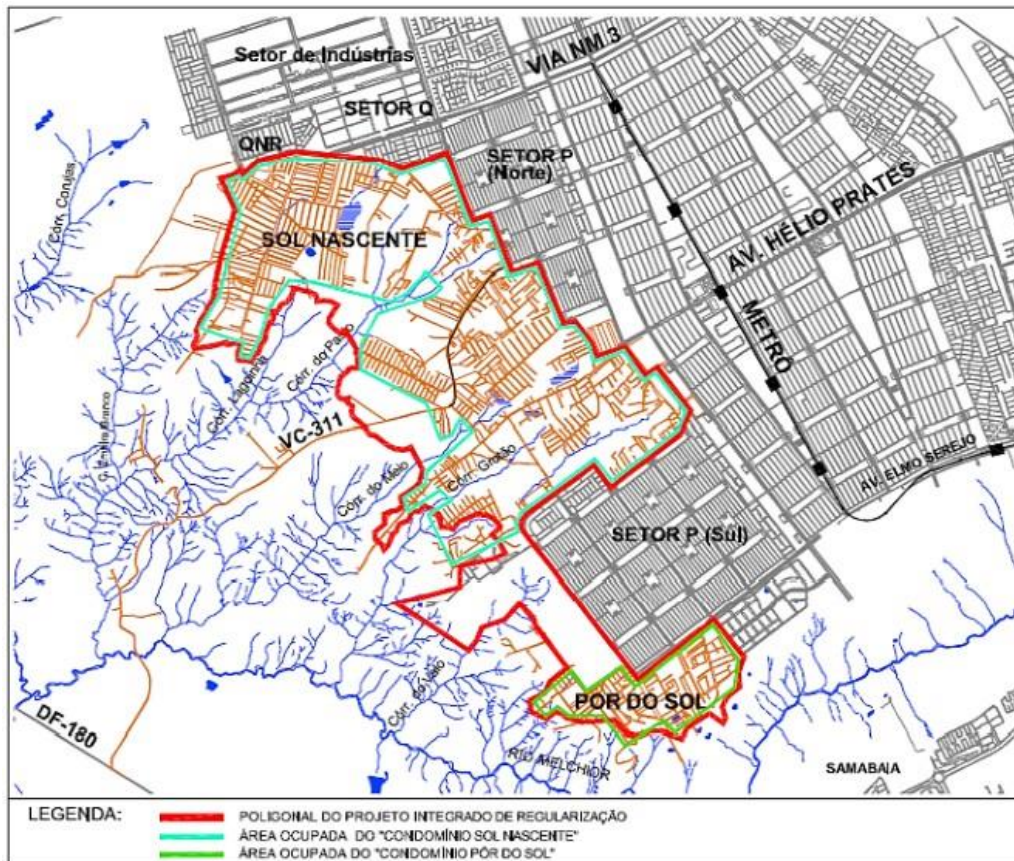


Figura 2. Limites do Setor Habitacional Sol Nascente (Godoy, 2013).

O estudo ambiental da região de Sol Nascente revelou que a mesma está totalmente inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) do Planalto Central, região onde deveria existir um parque ou uma unidade de conservação ambiental, porém, devido ao constante aumento da extensão do aglomerado, algumas áreas habitadas já ultrapassaram a fronteira da referida APA (Figura 3) (Canabrava, 2017; Lima, 2016).

A geomorfologia da região de estudo, de acordo com o Atlas do Distrito Federal elaborado pela CODEPLAN (2017), caracteriza-se por chapadões sedimentares arenosos com o surgimento de ribeirinhas nas chapadas, formas de relevo que foram evoluídas por processos de erosão, e uma topografia apresentando altitudes que variam entre 950 m a 1400 m, aproximadamente.

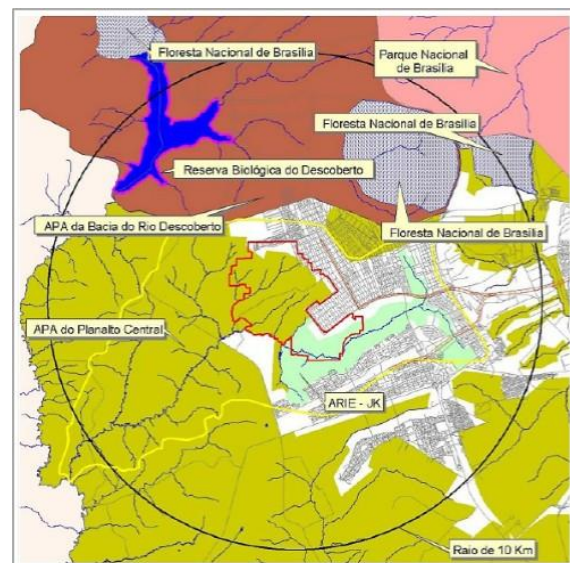


Figura 3. Ilustração das Unidades de Conservação em um raio de 10 km da região de estudo (Canabrava, 2017).

Quanto à hidrologia da região, o condomínio Sol Nascente está situado na bacia do Rio Descoberto, cuja principal sub-bacia é a do Rio Melchior (Figura 4) (CODEPLAN, 2017). Na Figura 5, encontra-se o mapa de solos para a região analisada.

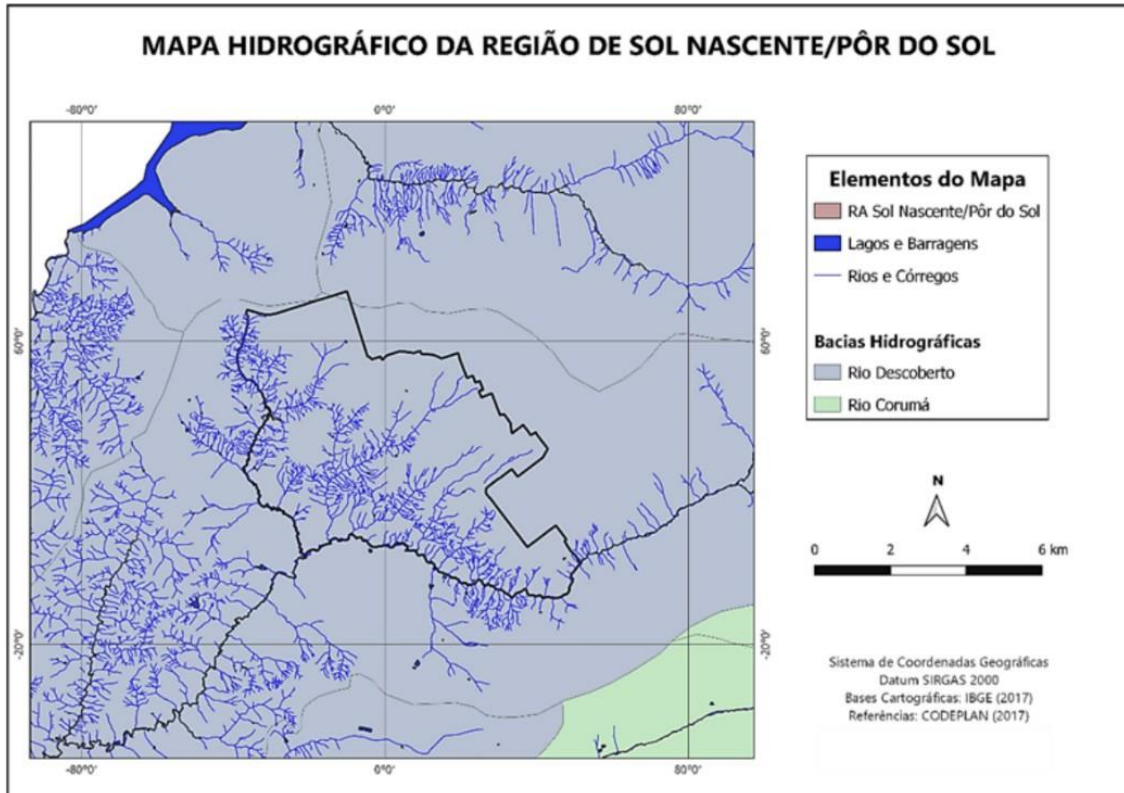


Figura 4. Mapa hidrográfico da região de estudo elaborado a partir dos dados disponíveis no GeoPortal.

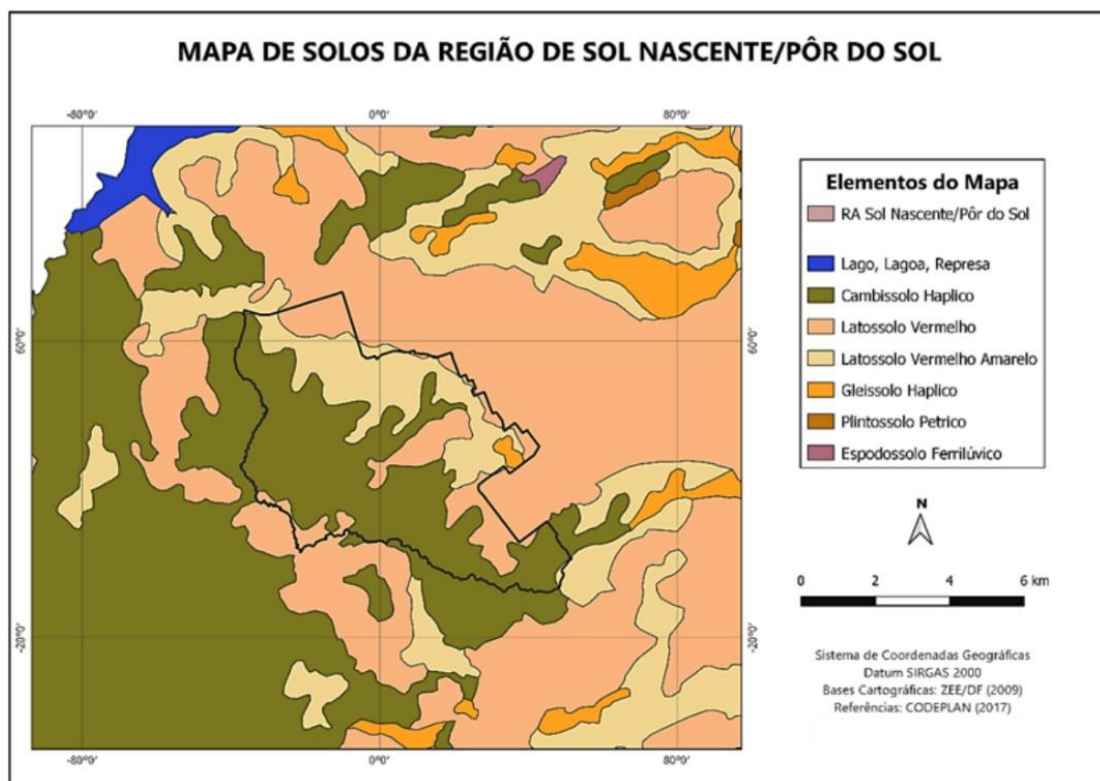


Figura 5. Mapa de solos da região de estudo elaborado a partir de dados fornecidos pela TERRACAP.

Em relação à pedologia, o solo é constituído por sedimentares antigos com alto índice de acidez, predominando os Cambissolos e Latossolos. Os primeiros são solos associados à vegetação de campo limpo e ocorrem em vertentes da bacia do rio Descoberto, encostas com declividade mais acentuada. Os Latossolos, por sua vez, são solos porosos, permeáveis e bem drenados associados à vegetação de cerrado e cerradão (EMBRAPA, 2004; CODEPLAN, 2017).

Para desenvolvimento da análise de aptidão geotécnica, os dados obtidos, bem como os mapas gerados do processamento e análise espacial, se limitam à zona urbana de Sol Nascente (Setor Habitacional Sol Nascente), de modo que esta é a região alvo do presente estudo e para a qual foram determinadas as áreas aptas e inaptas à ocupação.

Os materiais utilizados para realização das análises pertinentes à geração da carta de aptidão geotécnica e suas respectivas fontes encontram-se listados conforme segue:

- Levantamento planialtimétrico da região de estudo, fornecido pela TERRACAP – Companhia Imobiliária de Brasília;
- Mapa de solo e hidrografia do Distrito Federal, fornecido pela TERRACAP – Companhia Imobiliária de Brasília;
- Mapa de recursos hídricos do Distrito Federal disponibilizado pelo GeoPortal da Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação – SEDUH do Distrito Federal;

- Mapa de Áreas de Proteção Permanente (APP) do Distrito Federal disponibilizado pelo GeoPortal da SEDUH/DF;
- Mapa de lotes urbanos da região de estudo disponibilizado pelo GeoPortal da SEDUH/DF.

Após a obtenção e organização dos dados, estes foram avaliados de forma a seleccionar os que se apresentaram consistentes e pertinentes ao desenvolvimento da pesquisa que, posteriormente, comporiam as variáveis necessárias para a geração de banco de dados em ambiente SIG.

Para obter a carta de aptidão geotécnica, foram considerados como critérios determinantes do grau de aptidão à ocupação urbana os fatores de declividade, suscetibilidade à inundação, suscetibilidade a escorregamentos e a presença de áreas de restrições ambientais. Uma vez tendo mapeado essas áreas dentro da região de estudo com o software SPRING 5.4 foi realizado o procedimento de atribuição de pesos para esses critérios utilizando a técnica AHP e a combinação destes com as regiões restritivas do ponto de vista legal por meio de operações booleanas, resultando na carta de aptidão à ocupação.

O fluxograma da Figura 6 resume o procedimento metodológico adotado e os itens subsequentes apresentam um detalhamento das etapas realizadas.

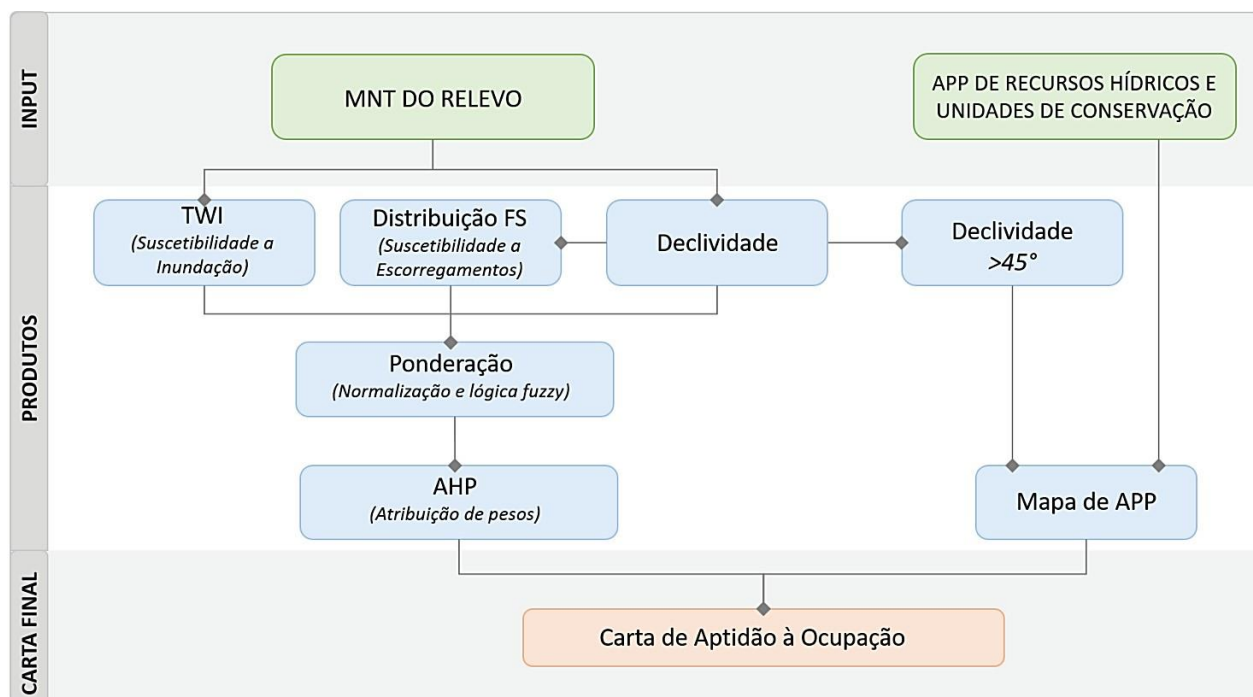


Figura 6. Fluxograma do procedimento metodológico.

A escolha da declividade como um dos elementos constituintes da definição da aptidão está ligada ao fato de que este fator condiciona diretamente a dinâmica da água no terreno, influenciando nos processos de infiltração e escoamento superficial (Campioli e Vieira, 2019). Já Thannoun e Ismael (2024) afirmam que é crucial, para que se tenha um desenvolvimento urbano equilibrado e uma eficaz gestão de desastres naturais, que se defina a vulnerabilidade de locais sujeitos às inundações. Em se tratando da susceptibilidade de deslizamentos, Zhang et al. (2022) definem que o processo de estabilidade de taludes desempenha um papel crucial na prevenção e mitigação de desastres ligados à movimentos de massa. Assim, avaliar a estabilidade de taludes por meio de critérios científicos fornece dados de entrada pertinentes ao planejamento e desenvolvimento do uso do solo (Carrión-Mero et al., 2021).

Para obtenção do critério de declividade, inicialmente foi realizada a manipulação do mapa de relevo oriundo da TERRACAP em ambiente SIG, através do software SPRING 5.4, o que possibilitou, inicialmente, o reconhecimento da distribuição da hipsometria, e a partir da qual foi gerada o plano de informação (PI) contendo a grade de declividade em valores de porcentagem e em graus por meio da função específica disponível no software.

O segundo critério, referente à suscetibilidade à inundação, foi avaliado mediante o cálculo do Índice Topográfico de Umidade (TWI). Conforme Nucifera e Putro (2017), o TWI possibilita medir o nível de umidade da superfície do solo a partir das características topográficas de uma área, de forma que valores altos deste índice representam umidades mais elevadas, enquanto

valores baixos indicam áreas mais secas (Latue e Rakuasa, 2023). A utilização do Índice Topográfico de Umidade pode ser considerada em diversos campos, como no mapeamento de áreas propensas a inundações (Hitouri et al., 2024). Para obtenção desse índice foram necessários os planos de informação de declividade e de fluxo acumulado, este último derivado do mapa de relevo por meio da função de rasterização *Catchment Area (flow racing)* executada no QGIS 3.10. Uma vez tendo as grades de valores dos dois planos, foi executada uma rotina de programação no LEGAL, extensão do SPRING para execução de álgebra de mapas, de forma a aplicar a equação do Índice Topográfico de Umidade (Equação 1).

$$TWI = \ln \left( \frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

Onde:

$A_s$ : área de contribuição específica do pixel (em m<sup>2</sup>);

$\beta$ : declividade do terreno (em radianos).

O plano de informação referente ao critério de suscetibilidade a escorregamentos foi obtido através da distribuição espacial de valores de fatores de segurança (FS), gerada por meio da manipulação dos dados do mapa de solos do Distrito Federal fornecidos pela TERRACAP. Para a obtenção da grade de valores de FS foi necessário, inicialmente, gerar a partir do mapa temático de solos, as grades numéricas de coesão, ângulo de atrito e espessura da camada de solo através de rotina no LEGAL, de forma que, para cada classe (tipo) de solo do plano de informação temático, foram atribuídos os respectivos valores dos parâmetros geotécnicos: coesão (C), peso específico do solo ( $\gamma$ ), ângulo de atrito ( $\phi$ ) e espessura do solo (H) (Tabela 1), obtidos com base no trabalho de Azevedo et al. (2018).

**Tabela 1.** Valores dos parâmetros geotécnicos do solo (Azevedo et al., 2018).

Classe de Solo	C (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (graus)	H (m)
Cambissolo Háplico	5,0	15,0	25,0	0,7
Espodossolo Ferrilúvico	20,0	12,0	10,0	4,0
Gleissolo Háplico	20,0	12,0	10,0	4,0
Latossolo Vermelho	10,0	15,0	20,0	3,0
Latossolo Vermelho Amarelo	10,0	15,0	20,0	3,0
Neossolo Quartzarênico	0	16,0	30,0	3,0
Plintossolo Pétrico	20,0	15,0	10,0	3,0

Em seguida, e utilizando o mesmo recurso do SPRING 5.4, foi executada uma rotina de programação com aplicação de equação para tratamento de taludes infinitos usando o LEGAL

(Equação 2). Os valores retornados corresponderam à distribuição espacial dos fatores de segurança FS, constituindo, dessa forma, o plano de informação que representa a suscetibilidade de ocorrência de

escorregamentos de massa dentro da região de estudo.

$$FS = \frac{C}{\gamma \cdot H \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta} + \frac{\tan\phi}{\tan\beta} \quad (2)$$

Onde:

FS: fator de segurança;

C: coesão do solo;

$\gamma$ : peso específico do solo;

$\beta$ : declividade do terreno, em graus;

$\phi$ : ângulo de atrito;

H: espessura do solo.

Para ser possível combinar os planos de informação no momento da geração do mapa final de aptidão à ocupação é necessário que estes estejam padronizados numa mesma escala. Para tanto, foi realizada rotina de programação no recurso de álgebra de mapas do SPRING 5.4 para valorar os planos de informação conforme pesos de 0 a 1, quanto à aptidão à ocupação.

O *PI* de declividade foi normalizado conforme pesos apresentados na Tabela 2. Para os valores de inclinação compreendidos no intervalo acima de 5% e valores menores ou iguais a 20%, utilizou-se uma função linear decrescente *fuzzy* para gradação dos pesos de modo a dizer que o valor máximo 1, quando a declividade é de 5%, decresce até chegar a zero, quando o valor da declividade apresenta valores iguais ou superiores a 20%. Os pesos adotados para as classes de declividade tiveram como referência o trabalho de Nascimento et al. (2009). Os critérios de ponderação para cada classe de declividade estão comentados na Tabela 2.

Os planos de informação das suscetibilidades à inundações e escorregamentos, por sua vez, foram normalizados conforme valores constantes de pesos apresentados na Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente. Os pesos adotados para as classes do índice topográfico de umidade foram estabelecidos com base nos trabalhos de Lin et al. (2006) e Rego (2013), que sugerem que solos bem drenados apresentam medidas de TWI variando de 4 a 5. Já em solos moderadamente drenados o índice está entre 5 e 7 e em solos mal drenados, por sua vez, encontram-se valores de TWI entre 7 e 12 (Lin et al., 2006). Os valores elevados de TWI estão associados a relevo plano e áreas de várzea, onde são encontrados Organossolos e Gleissolos, ou

áreas que permitem o acúmulo de água (Rego, 2013). Optou-se por unir os valores de TWI que representam solos bem drenados e moderadamente drenados em uma única classe que representasse a aptidão alta em termos de susceptibilidade à inundações. Para solos com TWI acima de 7, considerou-se que valores representariam condições extremas de acúmulo de água, impossibilitando, desta forma, a ocupação destas regiões.

Já para o fator de segurança, a NBR 11.682 (ABNT, 2009) estabelece que um talude necessita apresentar um valor de FS superior a 1,5 para ser considerado seguro. Com base nesta premissa, estabeleceu-se o intervalo de 1 (condição de equilíbrio limite para estabilidade) até 1,5 para a classe inapta. Para as demais classes, considerou-se parcialmente a categorização presente no trabalho de Silva et al. (2022), no qual há a geração de mapas de FS em função de diferentes cenários de espessuras do solo. As categorias de FS compreendidas de 2 a 3 e de 3 a 5, usadas por Silva et al. (2022), foram unidas no presente trabalho para representar a aptidão média, enquanto que as classes de 5 a 10 e valores maiores que 10 para FS foram transformadas em uma única faixa para incorporar as áreas consideradas seguras em termo de estabilidade. Estas, portanto, representam uma aptidão alta. Pela necessidade de se definir uma classe de aptidão média, empregou-se como limite inferior 1,5 (valor mínimo para considerar um talude seguro) e, como superior, 2.

Para a obtenção do plano de informação referente à delimitação das áreas de preservação permanente foi necessário buscar os critérios legais existentes que se enquadrassem na região de estudo, concluindo ser necessário para compor o mapa de APP as faixas marginais dos cursos d'água (com 30 m de largura em ambos os lados da drenagem), entorno de nascentes (buffer de 50 m) e áreas com declividade superior a 45° (o que equivale a inclinações superiores a 100%).

As áreas correspondentes às faixas marginais de cursos d'água e entorno de nascentes foram obtidas do GeoPortal da SEDUH/DF em arquivos do tipo *shapefile* e foram tratados com as ferramentas de geoprocessamento disponíveis no QGIS 3.8.3.

**Tabela 2.** Classes e pesos de declividade (Nascimento et al., 2009).

Classes de declividade (D)	Peso (0-1)	Aptidão à ocupação	Comentários sobre a ponderação dos critérios
$0\% \leq D \leq 2\%$	0,8	Média	Possibilidades de inundações e dificuldades para implantação de rede de drenagem pluvial e esgotamento sanitário
$2\% < D \leq 5\%$	1	Alta	Apta para ocupação
$5\% < D \leq 20\%$	$f(D) = (-0,06666D) + 1,33333$	Apta a Inapta	Suscetibilidade à erosão
$D > 20\%$	0	Inapta	Inclinações altas que tornam essas regiões inaptas à ocupação

**Tabela 3.** Classes e pesos de TWI (Lin et al., 2006; Rego, 2013).

Classes de TWI	Peso (0-1)	Aptidão à ocupação	Comentários sobre a ponderação dos critérios
$TWI < 7$	0,9	Alta	Solos considerados bem drenados e moderadamente drenados
$7 \leq TWI \leq 12$	0,5	Média	Solos com indicativo de drenagem mais baixa apresentando valores intermediários de TWI
$TWI > 12$	0	Inapta	Valores extremos que representam condições altas de acúmulo de água no solo minimizando a possibilidade de ocupação

**Tabela 4.** Classes e pesos de FS.

Classes de FS	Peso (0-1)	Aptidão à ocupação	Comentários sobre a ponderação dos critérios
$1 \leq FS < 1,5$	0,1	Inapta	Valores para os quais o talude não é considerado seguro
$1,5 \leq FS < 2,0$	0,4	Baixa	Valores levemente acima da condição mínima de segurança
$2,0 \leq FS < 5,0$	0,6	Média	Valores intermediários para o FS
$FS > 5,0$	1	Alta	Valores consideravelmente distantes da situação limite de estabilidade

Em posse do *PI* de declividade, foi realizado o procedimento para geração de uma outra camada de dados contemplando as áreas com declividade superior a 45°. Ao final desses procedimentos obteve-se o mapa de Áreas de Preservação Permanente, representado por áreas de proteção referentes aos recursos hídricos e áreas com declividade superior a 45°.

Finalmente, para obtenção do plano de informação representando um cenário com as áreas aptas à ocupação urbana foram realizadas as seguintes etapas:

i. Definição dos critérios: reitera-se que os critérios para a determinação da aptidão à ocupação considerados na análise foram:

- Declividade: fator que influencia diretamente no escoamento superficial, e conseqüentemente, no desencadeamento ou não de feições erosivas (Araújo, 2018);

- Suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos e inundações: fatores que limitam o uso e a ocupação em função do nível de ameaça que estes eventos oferecem à população;

- Restrições ambientais: áreas restritas à ocupação urbana em decorrência de sua limitação legal e/ou ambiental, que é o caso das áreas de proteção permanente e corpos d'água.

ii. Ponderação dos critérios: os critérios declividade, suscetibilidade a inundação e suscetibilidade a escorregamentos foram submetidos à técnica AHP de análise multicriterial, sendo atribuídos a uma matriz de comparação pareada a fim de determinar os seus respectivos pesos de ponderação. A técnica se baseia na atribuição de notas para cada critério (conforme Quadro 1), comparando-os entre si de par a par de modo a estabelecer uma hierarquia de importância

entre estes. O procedimento foi executado pelo software SPRING 5.4, que já possui acoplado em seus métodos de análise matricial a técnica de tomada de decisão AHP disponível no seu módulo específico de “Suporte à Decisão”, gerando como resultado valores de pesos para cada critério considerado na análise e uma razão de consistência menor do que 0,1 (10%), indicando que houve coerência e confiabilidade nas notas atribuídas aos critérios. Neste processo de definição dos pesos para as características que determinam a aptidão se considerou dois cenários para efeito de comparação: o primeiro definindo a ocorrência de deslizamentos como o fator com maior importância para a aptidão, seguido pelo critério de suscetibilidade à inundação e, por último, a declividade. Na segunda simulação, estabeleceu-se a prioridade para a suscetibilidade à inundação, com o fator de segurança em segundo lugar de importância e, por fim, a declividade. Em ambos os cenários, a relação de importância empregada entre as características consistiu na nota 5 (melhor que) para o fator mais importante em relação à característica menos importante, nota 3 (algo melhor) para a segunda característica em relação à de menor importância e nota 2 (um pouco melhor que) entre o fator mais importante e aquele na segunda colocação;

iii. Combinação dos critérios: os pesos obtidos da análise AHP realizada na etapa anterior foram inseridos no LEGAL juntamente com a criação de uma rotina de programação que executou o cruzamento das informações, gerando um único plano de informação referente à aptidão à ocupação, mas sem os elementos restritivos legais;

iv. Geração de carta: por fim, foi adicionado ao plano de informação o mapa de APP, gerando a carta final de aptidão à ocupação urbana.

Quadro 1. Escala de valores AHP (Saaty, 1977).

NOTAS	RELAÇÃO DE IMPORTÂNCIA
1	Igual a
2	Um pouco melhor que
3	Algo melhor que
4	Moderadamente melhor que
5	Melhor que
6	Bem melhor que
7	Muito melhor que
8	Criticamente melhor que
9	Absolutamente melhor que

**Resultados e Discussão**

Uma vez tendo os planos de informação de declividade, suscetibilidade à inundação e suscetibilidade à escorregamentos normalizados, foi utilizada a ferramenta de suporte à decisão do SPRING para aplicar o método AHP. Com o intuito de corroborar a relevância do papel do decisor e suas preferências, expressa no resultado final obtido

pela análise multicritério, foram realizadas duas iterações com o método, isto é, foram elaboradas duas matrizes de comparação: uma considerado a suscetibilidade a escorregamentos de massa como fator mais importante a se considerar em se tratando da definição de áreas aptas para ocupação urbana (Tabela 5), e outra considerando a suscetibilidade à inundação como fator mais relevante (Tabela 6).

**Tabela 5.** Matriz AHP “A” considerando o FS como fator mais importante na análise.

	<b>Declividade</b>	<b>TWI</b>	<b>FS</b>	<b>PESOS</b>
<b>Declividade</b>	1	1/3	1/5	0,109
<b>TWI</b>	3	1	1/2	0,309
<b>FS</b>	5	2	1	0,582
Razão de Consistência (RC)				0,005

**Tabela 6.** Matriz AHP “B” considerando o TWI como fator mais importante na análise.

	<b>Declividade</b>	<b>TWI</b>	<b>FS</b>	<b>PESOS</b>
<b>Declividade</b>	1	1/5	1/3	0,109
<b>TWI</b>	5	1	2	0,582
<b>FS</b>	3	1/2	1	0,309
Razão de Consistência (RC)				0,005

Para a matriz “A” o software retornou valores de pesos de ponderação de 0,582 para o fator de segurança, denotando a maior influência deste critério na determinação da aptidão à ocupação, seguido pelo índice topográfico de umidade *TWI* representando a suscetibilidade à inundação com 0,309 e, por último, a declividade apresentando a menor influência (0,109).

No outro cenário elaborado, representado pela matriz AHP “B”, foram atribuídas as mesmas notas, invertendo-se o fator de maior influência considerado: agora a suscetibilidade à inundação (*TWI*) correspondeu ao peso de 0,582, seguido pela suscetibilidade a escorregamento com influência de 0,309. A declividade permaneceu como o fator de menor influência (0,109).

Os pesos obtidos de cada análise ponderada foram inseridos na rotina de programação do LEGAL, onde os planos de informação de declividade, *TWI* e *FS* foram combinados através de equação de combinação linear ponderada (Equação

3 e Equação 4), gerando um plano de informação referente à aptidão à ocupação para cada situação analisada:

*PI* de aptidão “A” correspondente à Matriz “A”:

$$PI_A = 0,582 * FS + 0,309 * TWI + 0,109 * D \quad (3)$$

*PI* de aptidão “B” correspondente à Matriz “B”:

$$PI_B = 0,582 * TWI + 0,309 * FS + 0,109 * D \quad (4)$$

As grades numéricas dos planos de informação resultantes foram fatiadas e transformadas em representações temáticas através da ferramenta de reclassificação, de modo a traduzir os aspectos de capacidade e restrição quanto à ocupação urbana do meio físico em cinco classes representativas, propostas por Nascimento et al. (2009). A definição das classes e os respectivos intervalos adotados encontram-se listados na Tabela 7.

**Tabela 7.** Classes de fatiamento do mapa de aptidão (Nascimento et al., 2009; Araújo, 2018).

<b>Intervalos</b>	<b>Classes de Aptidão</b>
0,0 – 0,1	Inapta
0,1 – 0,4	Escassa Aptidão
0,4 – 0,7	Baixa Aptidão
0,7 – 0,9	Média Aptidão
0,9 – 1,0	Apta

Os mapas de aptidão à ocupação resultantes do fatiamento em classes estão apresentados na Figura 7 e Figura 8. Verifica-se que o grau de aptidão à ocupação urbana do Setor Habitacional Sol Nascente se apresentou de maneira distinta para cada situação considerada, isto é, obteve-se como resultado duas representações da aptidão à ocupação para a região analisada. Foi possível evidenciar, portanto, que a preferência do decisor no momento da definição do critério de maior relevância na

análise é determinante na representação do mapa e na definição das áreas aptas e inaptas à ocupação urbana, bem como na avaliação da adequação geotécnica de determinada região.

Esse resultado permitiu ainda conhecer qual dos dois eventos considerados (susceptibilidade a inundações e susceptibilidade a escorregamentos de massa) representa maior ameaça à população que reside na área de estudo.

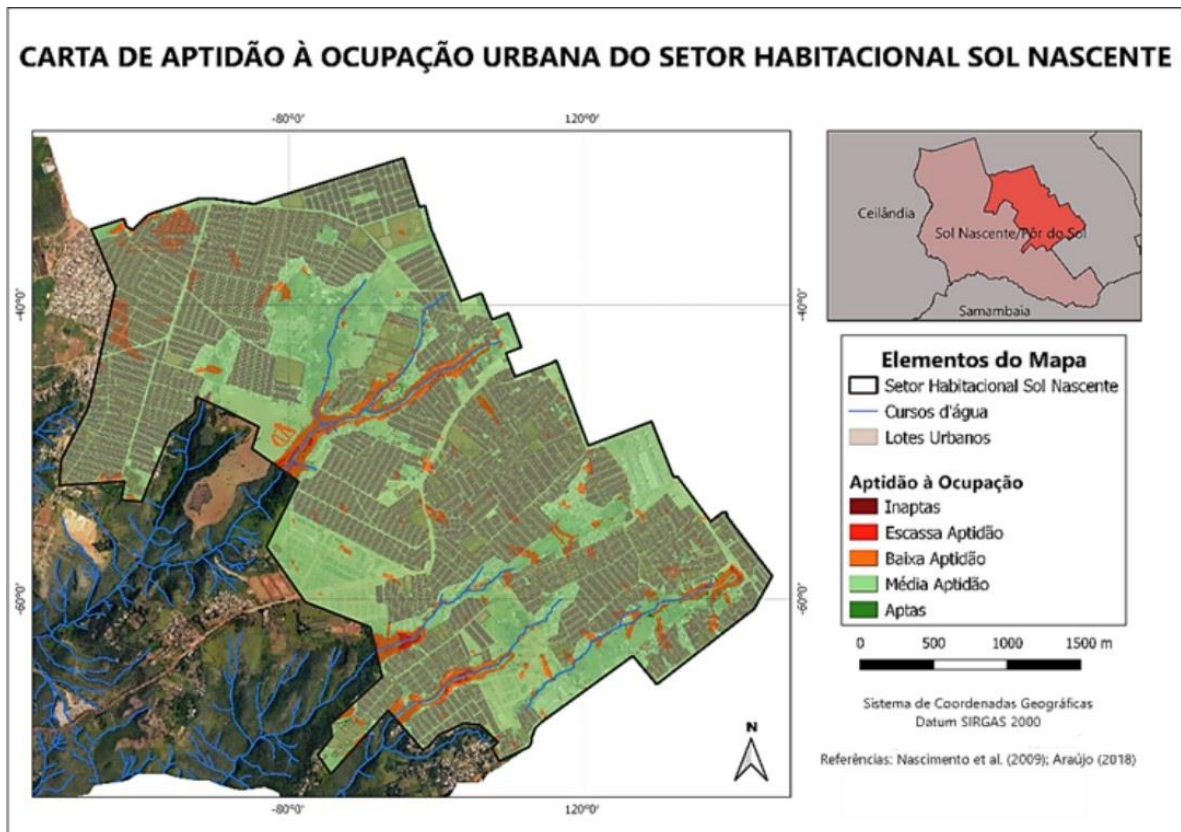


Figura 7. Representação do Mapa de Aptidão à Ocupação “A”: FS considerado como fator de maior influência.

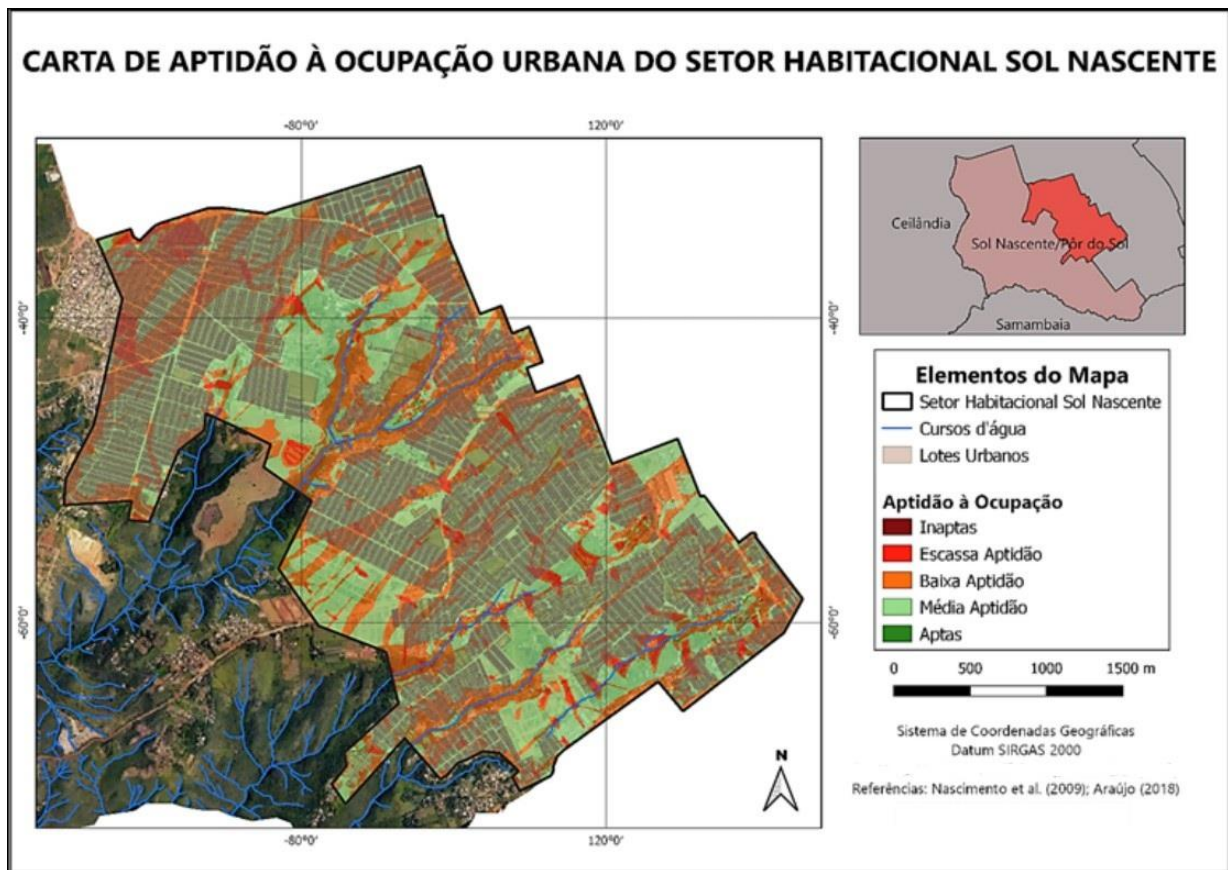


Figura 8. Representação do Mapa de Aptidão à Ocupação “B”: TWI considerado como fator de maior influência.

Nota-se que, ao se considerar o índice topográfico de umidade (TWI) como fator de maior influência na determinação da aptidão à ocupação no momento da elaboração da matriz de ponderação, o mapa “B” (Figura 8) apresenta maior percentual de áreas de escassa e baixa aptidão que o Mapa “A”. Isto é, uma vez que se considera a suscetibilidade à inundação como fator de maior ameaça à ocupação urbana, enfatiza-se a necessidade de valores adequados de TWI para que as áreas sejam consideradas aptas, revelando que a região de estudo deve maior atenção aos processos de inundações e alagamentos do que a processos de escorregamentos de massa.

O cruzamento com o plano de informação relativo ao *FS* informa que a classe de baixa aptidão possui áreas que atingem valores inferiores a 2,0, enquanto para as áreas de escassa aptidão os valores dos fatores de segurança são inferiores a 1,5. Sendo assim, baixos valores de *FS* correspondem abaixo nível de aptidão à ocupação. Para a declividade, as áreas aptas associam-se a valores de inclinação de taludes inferiores a 20%, com atenção especial para áreas com declividade inferior a 2%, que por existir a possibilidade de ocorrência de inundações, além de dificuldades para implantação de redes de drenagem pluvial e esgotamento sanitário, foram

classificadas como média aptidão. Baixa aptidão, escassa aptidão e áreas inaptas possuem regiões definidas por declividades superiores a 20%, uma vez que quanto maior a inclinação do talude, maior a suscetibilidade à ocorrência de processos erosivos. Isso também evidencia a restrição à ocupação destas áreas e justifica a inclusão dessas faixas na delimitação das áreas inaptas a urbanização (Araújo, 2018). Quanto à suscetibilidade a inundação, áreas de alta aptidão correspondem a valores de *TWI* inferiores a 7, o que sugere a ocorrência de solos bem drenados ou moderadamente drenados. Áreas de média aptidão se referem a valores inferiores a 12, caso de ocorrência de solos mal drenados, o que propicia o surgimento de processos de alagamentos e inundações, tornando, dessa forma, inaptas as áreas com valores de *TWI* superiores a 12 (Lin et al., 2006; Rego, 2013). Observa-se que a maior incidência de classificações para áreas de baixa aptidão no cenário que considera o índice de TWI como o mais relevante se processa em função da própria definição do modelo envolvido. Por um lado, esse modelo define regiões propensas a desenvolverem processos de alagamento em declividades menores. Uma vez que a área sob análise possui locais com essas características, a

classificação com menores escores se destaca. Somando-se a este aspecto, nas zonas com altos valores de fluxo acumulado, a tendência é que se classifique com menor aptidão geotécnica, onde se destaca os pixels nas bases das encostas, as quais recebem maior contribuição de fluxo. A união destas duas situações promove um cenário menos adequado quando comparado ao cenário de ocupação “A”. Neste último, a tendência de incidência de classes menos aptas está delimitada ao longo das vertentes, já que o modelo de estabilidade de taludes incorpora valores mais altos de declividade como agente de redução do FS. Nota-se ainda que os locais categorizados com baixa aptidão fora das vertentes dos taludes no cenário que prioriza o FS são ampliados em área e categorizados como escassa aptidão quando se analisa como cenário relativo ao TWI. Entende-se que isso acontece porque a influência do fator de declividade amplia sua atuação no sentido de reduzir a possibilidade de ocupação.

Para obtenção da aptidão à ocupação da área de estudo foi elaborada uma carta geotécnica para cada cenário analisado, de modo a enfatizar a importância do gestor da decisão.

Com o objetivo de delimitar a região urbana de Sol Nascente em polígonos de áreas aptas e inaptas, o plano de informação foi novamente reclassificado, de modo que os valores correspondentes às classes “Média Aptidão” e “Apta” foram considerados áreas aptas à ocupação, visto que representam um nível aceitável de ameaça, não possuindo restrições do ponto de vista legal e dos aspectos estudados, e a grade de valores referente às classes “Escassa” e “Baixa Aptidão” passaram a delimitar áreas a serem evitadas para a ocupação, uma vez que representam um grau de ameaça pertinente com base nos fatores condicionantes utilizados nas suas definições. As áreas inaptas, por sua vez, caracterizam-se pelas áreas de proteção permanente, delimitadas conforme a Lei nº 12.651/2012 (Brasil, 2012), que implementa o novo Código Florestal Brasileiro.

Posteriormente, foram incorporadas às cartas de aptidão as Áreas de Preservação Permanente para compor as áreas inaptas, de modo que foi realizada a poligonização (conversão de *raster* para vetor) do mapa e, por fim, a divisão deste

em áreas de interesse, tomando como referência o trabalho de Araújo (2018) e a Lei nº 12.651/2012 referente ao novo Código Florestal Brasileiro, conforme segue:

1. Área Intangível:
  - Áreas nas faixas marginais de cursos d’água com buffer de 30 m (APP);
  - Áreas no entorno das nascentes e dos olhos d’água perenes, no raio de 50 metros (APP);
  - Áreas com declividade superior a 45° (APP);
  - Áreas com extrema suscetibilidade à movimentação de massa e ocorrência de inundação.
2. Área de Suscetibilidade: áreas que apresentam elevado grau de suscetibilidade à movimentação de massa e ocorrência de inundação;
3. Área Apta: compreende a área em que não há restrições ambientais, não existe faixa de APP, nem ameaça geotécnica.

A Figura 9 apresenta o mapa de APP da região de estudo. Finalmente, os mapas finais de aptidão geotécnica para fins de urbanização do Setor Habitacional Sol Nascente estão apresentados na Figura 10 e Figura 11.

Observa-se através da comparação das cartas de aptidão “A” e “B” (Figuras 10 e 11, respectivamente) que a primeira apresenta um cenário mais favorável à ocupação urbana: para esta situação, que apresenta a suscetibilidade à escorregamentos de massa como fator que fornece maior risco à ocupação, a extensão de áreas aptas do Setor Habitacional Sol Nascente é de 816,073 ha, o que corresponde a 87,3% de sua área total, ao passo que possui 5,67 ha de áreas em situação de suscetibilidade aos eventos analisados. Em contrapartida, esse cenário se diferencia significativamente do mapa obtido para a suscetibilidade a inundações como fator de maior risco à população, onde se observa um maior percentual de áreas de suscetibilidade, que passaram a representar 33,2% da região de estudo, referente aos 310,6 ha de extensão, enquanto as áreas passíveis à ocupação corresponderam a 54,8%, se estendendo por 512,14 ha.

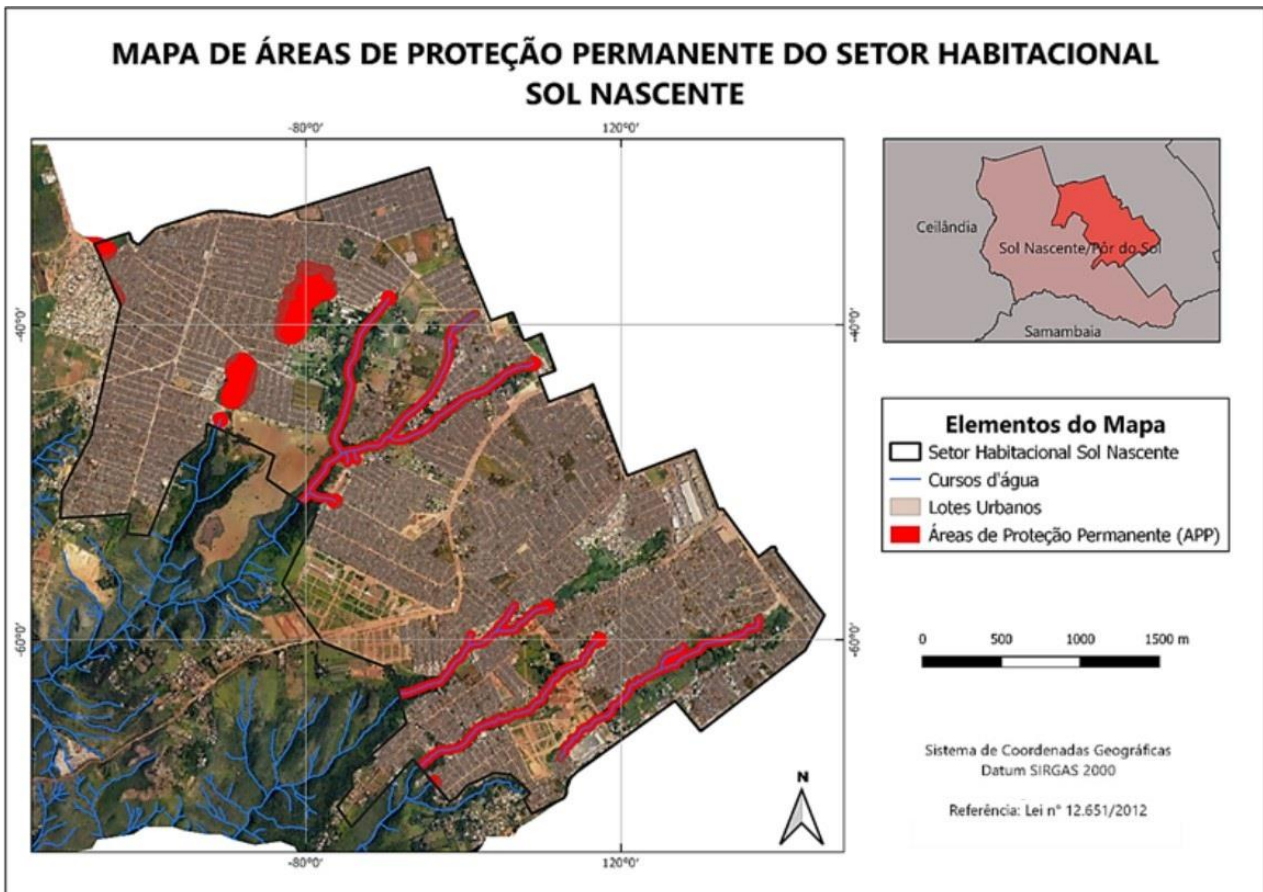


Figura 9. Mapa de Áreas de Proteção Permanente do Setor Habitacional Sol Nascente.

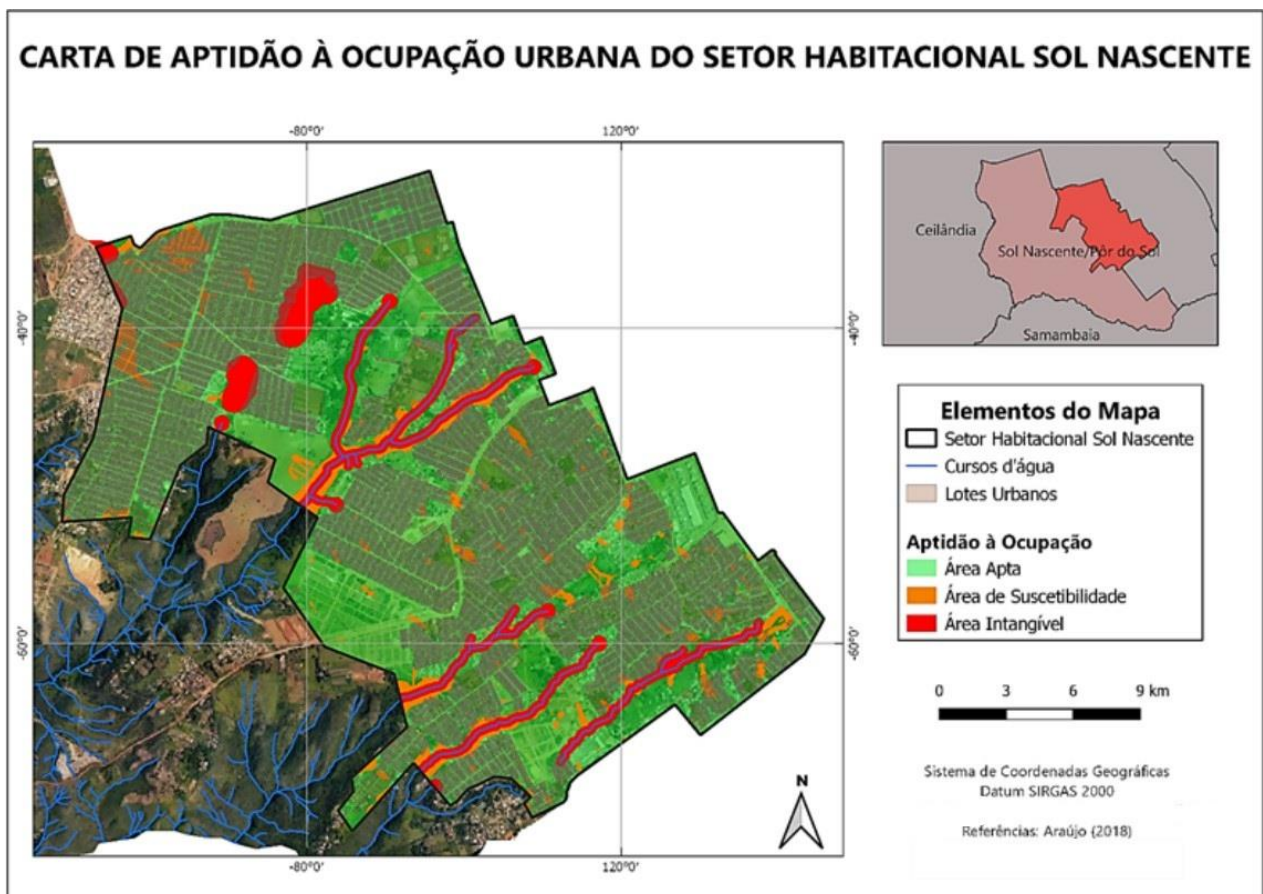


Figura 10. Carta Geotécnica “A” de Aptidão à Ocupação Urbana do Setor Habitacional Sol Nascente – DF.

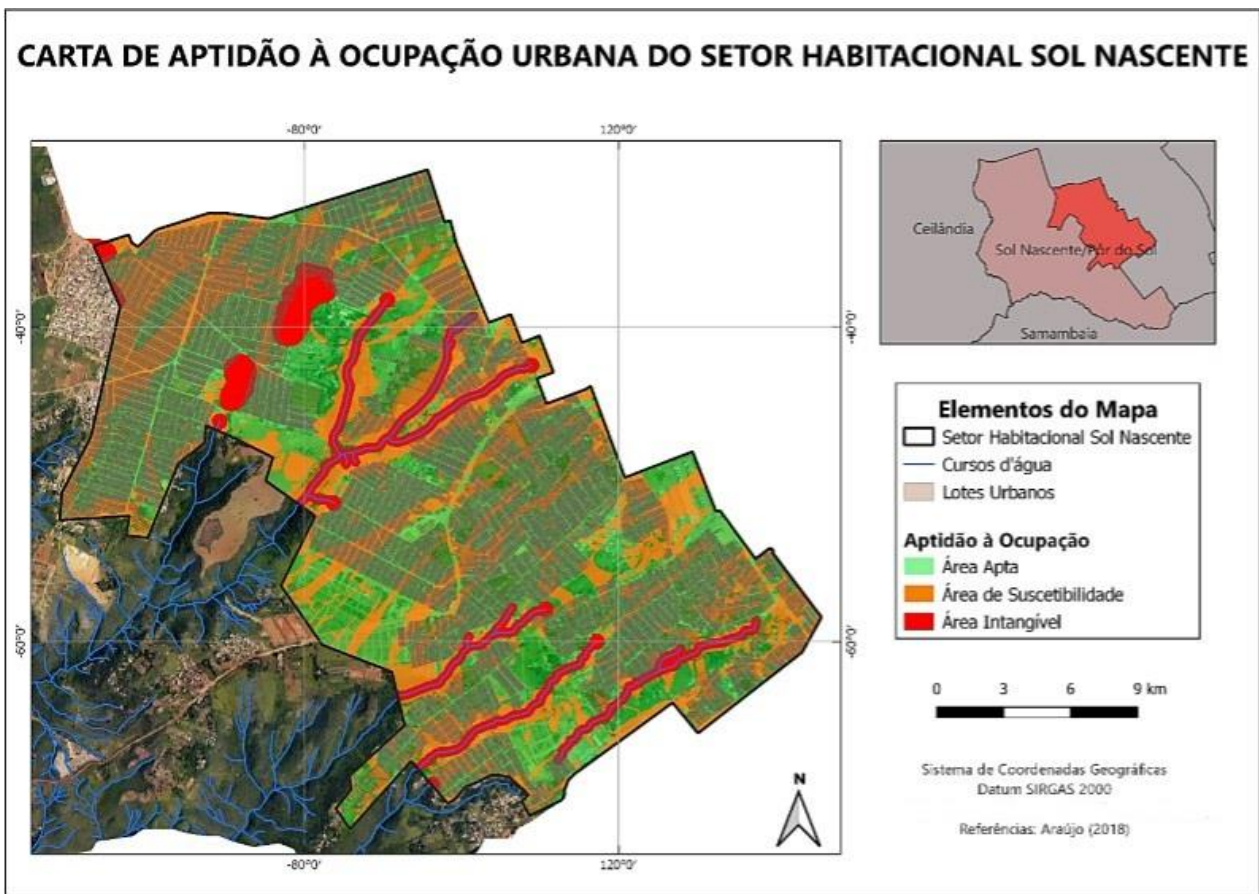


Figura 11. Carta Geotécnica “B” de Aptidão à Ocupação Urbana do Setor Habitacional Sol Nascente – DF.

Constata-se ainda que as áreas de suscetibilidade em ambos os mapas se referem, predominantemente, a processos de inundações e alagamentos, o que é facilmente justificado pela maior incidência destas nas regiões mais próximas aos canais de drenagem, reforçado pelo fator condicionante para ocorrência de tais eventos, a saber, pouca distância entre o nível do freático e a superfície do terreno. Outro aspecto que pode explicar essa maior influência por parte do critério de inundação, está na definição do índice de umidade. Em muitos pontos, a área de contribuição possui valores mais elevados para inclinações menores, o que eleva o TWI. Conseqüentemente, a quantificação da aptidão diminui, principalmente no cenário que considera com maior importância esse aspecto. No que concerne às ameaças de escorregamentos de massa a que estão submetidas as regiões de suscetibilidade, o tipo mais provável de desestabilização nos taludes se refere ao deslizamento rotacional em virtude das características geotécnicas do solo da região, cabe ressaltar, o comprimento das encostas tem valor próximo da espessura da camada de material inconsolidado (Araújo, 2018).

Com relação à distribuição espacial dos resultados de aptidão, para ambos os cenários,

observa-se a presença da classificação de “Áreas de Susceptibilidade” em regiões ao longo da extensão dos córregos. Pelo fato de estarem próximas das drenagens, a tendência é estas áreas possuam inclinações maiores nas encostas e que o índice de umidade do solo seja maior. Isto determina, nas situações avaliadas, indicações de aptidão a ocupação menores. No entanto, a importância relativa dada a cada variável nas análises determina as configurações de distribuição, de forma que mais áreas foram classificadas como suscetíveis ao longo das drenagens, situadas além das APP’s, no cenário onde a ocorrência de inundação é considerada mais importante. As cartas conseguidas para as duas configurações propostas podem ser utilizadas de forma complementar, já que, apesar de usarem as mesmas variáveis ambientais preditoras, cada análise ponderou tais elementos diferentemente. Isso permite observar a atuação de um fator específico na susceptibilidade perante os demais elementos que compõe a análise, sendo que as tendências obtidas nos mapas podem ser confirmadas por levantamentos de campo e instrumentação. Desta forma, conforme Nogueira et al. (2019), estas cartas servem como diretrizes no processo de ocupação do solo quando se refere à susceptibilidade aos desastres.

Ferramentas cartográficas desta natureza permitem identificar zonas com maiores tendências de ocorrência de desastres e, conseqüentemente, prioritárias do ponto de vista de intervenção. Esta intervenção pode ser entendida como uma ação direta, pela execução de obras físicas, ou indiretamente pela necessidade de monitoramento. Desta forma, permitem direcionar recursos e atuações para pontos críticos já existente, além de contribuir para o ordenamento territorial para evitar o surgimento de novas áreas de risco. Esses mapas podem inclusive contribuir com produtos já existentes na gestão do território, bem como nortear programas adicionais de pesquisa. Neste sentido, Vasconcelos et al. (2018) destacam que mapas com possíveis tendências e indutores de urbanização presentes nesses tipos de resultados podem auxiliar os governantes no processo de revisão do plano diretor, inclusive no curso tomado pela expansão urbana.

As APP do Setor Habitacional Sol Nascente, por sua vez, delimitam, ao todo, 112,26 ha de área, o que representa 12,0% de toda região de estudo, caracterizando as áreas intangíveis apresentadas nas cartas de aptidão. Contudo, nota-se que essas áreas já têm seus limites ultrapassados pelos lotes urbanos, permitindo reafirmar a irregularidade do processo de ocupação do Setor Habitacional Sol Nascente: de todo o território de proteção permanente, 9,86 ha já estão sendo ocupados, o que em termos percentuais representa 8,8% das áreas protegidas pela Lei nº 12.651/2012 (Brasil, 2012).

## Conclusões

Os resultados obtidos através da geração das cartas de aptidão geotécnica do Setor Habitacional Sol Nascente permitiram atingir o objetivo central desta pesquisa, que tinha por intuito realizar a avaliação da adequação geotécnica da área de estudo para fins de urbanização, de modo a constituir um banco de informações à disposição do planejamento urbano para fornecer diretrizes ao processo de ocupação urbana, uma vez sabendo que o assentamento irregular em áreas com elevado nível de ameaça compromete a segurança pública e o meio ambiente.

Duas cartas de aptidão geotécnica foram geradas considerando-se cenários distintos de importância dos fatores ambientais. Observou-se que a hierarquia correspondente à importância dos fatores usados (fator de segurança, índice topográfico de umidade e declividade) para a avaliação influenciou nos mapas obtidos. No primeiro cenário, a susceptibilidade à ocorrência de

deslizamentos, representada pelo FS, foi definida como fator preditor mais importante. Em uma segunda análise, a susceptibilidade a eventos de inundação (índice TWI) foi imposta como a principal característica ligada à aptidão geotécnica. Mais áreas foram classificadas nos menores níveis de aptidão para o caso em que se considerou a característica de inundação como o preponderante, já que modelo usado define valores mais baixos de aptidão tanto para regiões com baixas declividades quanto para locais com grandes quantidades de fluxo acumulado. Para a situação cuja o fator de segurança tem um peso maior na determinação da aptidão à ocupação, observa-se que as áreas com menores propensões a serem ocupadas sem riscos estavam localizadas principalmente nas vertentes dos taludes que acompanham as drenagens naturais em função da diminuição da estabilidade com o aumento da declividade. Em ambos os cenários, as zonas de mais inclinadas dos taludes apareceram com aptidões menores.

Constatou-se através das cartas geradas que a maioria das áreas de baixa aptidão à ocupação, sugerindo maior suscetibilidade a escorregamentos de massa e inundações, coincide com as áreas delimitadas como proteção permanente (APP), de modo a atestar que a restrição legal confina a área que não deveria ser ocupada irregularmente.

Sobretudo, os resultados obtidos a partir da presente pesquisa sugerem a necessidade de haver limitações quanto à ocupação irregular das áreas mapeadas com aptidão igual ou inferior à classe escassa, de modo a agir como medida preventiva em função da expansão urbana realizada em áreas com suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos e inundações, haja vista que esses eventos podem resultar em prejuízos catastróficos.

Ainda, com a elaboração de duas cartas referentes a duas aplicações distintas do método de análise multicriterial *AHP* (Processo de Análise Hierárquica) foi possível corroborar a importância do papel do gestor da decisão na análise de alternativas associadas ao estudo de eventos geoambientais, entendendo que a complexidade da escolha, sendo esta dependente de um grande leque de fatores condicionantes de tais eventos, requer o uso de ferramentas de análise que auxiliem o estabelecimento de níveis de importância entre esses fatores, combinando-os de forma a gerar um cenário resultante dessa hierarquização, cenário este que, pode-se concluir, reflete as preferências do decisor.

Ademais, enfatiza-se que os procedimentos de análise espacial por abordagem multicritério se

apresentaram adequados e coerentes na combinação dos fatores intervenientes da dinâmica da região de estudo associada ao grau de aptidão à ocupação, sendo possível ressaltar, ainda, a importância do uso das geotecnologias para estudo do espaço geográfico, sendo sua precisão, segurança e agilidade de coleta, processamento e análise de dados indispensáveis para a elaboração dos mapas de suscetibilidade e aptidão do Setor Habitacional Sol Nascente, localizado em Sol Nascente/Pôr do Sol – DF. Tais produtos possibilitam identificar regiões que possuem susceptibilidade para o desenvolvimento de eventos ligados a desastres naturais, norteando a aplicação de intervenções corretivas e auxiliando no processo de ordenamento e planejamento territorial.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Maranhão (UFMA) pelo apoio e fomento à pesquisa científica.

### Referências

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. NBR 11.682 - Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro.
- Al-Ghorayeb, A., Al-Shaar, W., Elkordi, A., Faour, G., Al-Shaar, M., Attalah, Y., 2023. Land Suitability Analysis for Sustainable Urban Development: A Case of Nabatiyeh Region in Lebanon. *Multidisciplinary Scientific Journal* 6, 267–285. <https://doi.org/10.3390/j6020020>.
- Araújo, P.G.O., 2018. Geração de Carta de Aptidão Geotécnica para Fins de Ocupação Urbana do Setor Habitacional Bernardo Sayão. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Azevedo, G.F.; Carvajal, H.E.M.; Souza, N.M., 2018. Análise de ameaça de deslizamentos pelo uso de abordagem probabilística aplicada a um modelo de estabilidade de taludes tridimensional. *Revista Geociências [online]* 37. Disponível: [https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/37/volume37\\_3\\_files/37-3-artigo-14.pdf](https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/37/volume37_3_files/37-3-artigo-14.pdf). Acesso: 21 nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i3.11798>.
- Bispo, C.O., Melo, N.A., Toujaguez, R., 2019. Ocupação irregular de encostas urbanas no município de Maceió - AL. *Okara: Geografia em debate [online]* 13. Disponível: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/okara/article/view/39080/29100>. Acesso: 01 ago. 2023.
- DOI: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1982-3878.2019v13n1.39080>.
- Brasil. Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012. Novo Código Florestal. Disponível: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm). Acesso: 15 nov. 2020.
- Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., 2001. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics* 20, 395-403. DOI: [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](https://doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8).
- Campoli, P.F., Vieira, C.V., 2019. Avaliação do Risco a Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, Joinville/SC. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 124-138. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p124-138>.
- Campos, J.A., Silva, D.D., Moreira, M.C., 2021. Environmental fragility and land use capacity as instruments of environmental planning, Caratinga River basin, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 80. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09553-2>.
- Canabrava, D.S., 2017. Avaliação do desempenho ambiental da favela Sol Nascente em Brasília – DF e os objetivos de desenvolvimento sustentável. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Carrión-Mero, P., Briones-Bitar, J., Morante-Carballo, F., Stay-Coello, D., Blanco-Torrens, R., Berrezueta, E., 2021. Evaluation of Slope Stability in an Urban Area as a Basis for Territorial Planning: A Case Study. *Appl. Sci.* 11, 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11115013>.
- CODEPLAN. Companhia de Planejamento do Distrito Federal, 2017. Atlas do Distrito Federal [livro eletrônico]. Brasília/DF.
- CODEPLAN. Companhia de Planejamento do Distrito Federal, 2019. Nota Técnica - Sol Nascente/Pôr do Sol: um retrato demográfico e socioeconômico. Brasília/DF.
- Coelho, L.A.F., Nunes, A.B., 2020. Eventos Recentes de Chuva Intensa na Cidade do Rio de Janeiro: Análise Sinótica. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 994-1012. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p994-1012>.
- Cruz, A.M.A., Ferreira, D.V., Azevedo, G.F., Bazán, F.A.V., Bezerra, A.H.L., Queiroz, P.C.O., 2023. Uso de métodos probabilísticos na análise de estabilidade de taludes. São Luís, Maranhão, Brasil. *Revista EIA [online]* 20. Disponível: <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/1623/1519>. Acesso: 04 ago

2023. DOI: <https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1623>.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2004. *Evolução Geomorfológica do Distrito Federal*. Brasília/DF.
- Fawad, M., Ullah, F., Irshad, M., Shah, W., Mahmood, Q., Ahmad, I., 2022. Marble waste site suitability assessment using the GIS-based AHP model. *Environ Sci Pollut Res Int.* 29, 28386–28401. DOI:10.1007/s11356-021-18373-7.
- Ferreira, D.V., Azevedo, G.F., 2022. Diferença entre as configurações de fator de segurança usando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e a envoltória curva de Lade (2010). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais* [online] 13. Disponível:<https://sustenere.co/index.php/rica/article/view/6932/3553>. Acesso: 01 ago 2023. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.001.0008>.
- Godoy, C.D., 2013. Sol nascente - trecho 2: redesenho e requalificação urbana. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Hitouri, S., Mohajane, M., Lahsaini, M., Ali, S.A., Setargie, T.A., Tripathi, G., D'Antonio, P., Singh, S.K., Varasano, A., 2024. Flood Susceptibility Mapping Using SAR Data and Machine Learning Algorithms in a Small Watershed in Northwestern Morocco. *Remote Sens.* 16, 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050858>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019. *Aglomerados subnormais*. Rio de Janeiro.
- Ikiriko, T.D., Enwin, A.D., 2023. The Relevance of Geotechnical Investigation to Urban Development: A Review of Literature. *International Journal of Advances in Engineering and Management* 5, 354-362. DOI: 10.35629/5252-0504354362.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2015. *Guia Cartas Geotécnicas: orientações básicas aos municípios* [livro eletrônico]. São Paulo.
- Khan, M.S., Park, J., Seo, J., 2021. Geotechnical Property Modeling and Construction Safety Zoning Based on GIS and BIM Integration. *Applied Sciences* 11, 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11094004>.
- Latue, P.C., Rakuasa, H., 2023. Identification of Flood-Prone Areas Using the Topographic Wetness Index Method in Fena Leisela District, Buru Regency. *Journal Basic Science and Technology* 12, 20-24. DOI: <https://doi.org/10.35335/jbst.v12i1.3673>.
- Lima, P.I.S.B., 2016. *Sistema viário na urbanização de assentamentos precários: estudo de caso em Sol Nascente*. Monografia. Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília.
- Lin, H.S., Kogelmann, W., Walker, C., Bruns, M. A., 2006. Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydrogeological perspective. *Geoderma* [online] 131. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.013> .DOI:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.013>.
- Lira, K.C.S., Francisco, H.R., Feiden, A., 2022. Classificação de fragilidade Ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. *Sociedade & Natureza* 34, 1-17. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-62872>.
- Luan, C., Liu, R., Peng, S., 2021. Land-use suitability assessment for urban development using a GIS-based soft computing approach: A case study of Ili Valley, China. *Ecological Indicators* 123, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107333>.
- Masoudi, M., Centeri, C., Jakab, G., Nel, L., Mojtahedi, M., 2021. GIS-based multi-criteria and multi-objective evaluation for sustainable land-use planning (case study: Qaleh Ganj County, Iran) “Landuse planning using MCE and Mola”. *Int. J. Environ. Res.* 15, 457–474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00326-0>.
- Medeiros, F.H.F., Lunardi, V.O., Lunardi, D.G., 2022. Multi-Criteria Decision Analysis as Subsidy for the Determination of Suitability Areas to Achieve Goals in National Parks. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 15. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/252438/41163>. Acesso: 03 ago 2023.
- Nascimento, V.M.L.C., Lima, E.R.V, Santos, C.A.G., 2009. SIG na avaliação de áreas para ocupação urbana de João Pessoa, PB. *Ambiente Construído* 9, 107-123.
- Nogueira, F.R., Vasconcelos, V.V., Motta, M.R., Varallo, L.S.S., 2019. Carta geotécnica de aptidão à urbanização: instrumento de planejamento para prevenção de desastres naturais no município de Itapeçerica da Serra, SP. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental* 2, 26-35.
- Nucifera, F., Putro, S.T., 2017. Deteksi Kerawanan Banjir Genangan Menggunakan Topographic Wetness Index (TWI). *Media Komunikasi Geografi* 18, 107-116. DOI:

- <https://doi.org/https://doi.org/10.23887/mkg.v18i2.12088>.
- Oliveira, B.R., Silva Junior, E.E., Souza, N.M., 2019. Cartas Geotécnicas Aplicadas ao Planejamento Urbano: Estudo de Caso no Setor Habitacional Taquari/DF. Anuário do Instituto de Geociências [online] 42. Disponível: <https://revistas.ufjf.br/index.php/aigeo/article/view/31188/17666>. Acesso: 01 ago 2023. DOI: [https://doi.org/10.11137/2019\\_3\\_98\\_111](https://doi.org/10.11137/2019_3_98_111).
- Pessoa, M.N.A., 2009. Ocupação Irregular de Terras e Criação de Centros de Desenvolvimento Econômico em Ceilândia – DF. Monografia de Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, DF.
- Ramos, R.R.S., Silva, C.R., Araújo, A.A., Barbosa, M.I.M., Pacheco, A.P., Oliveira, J.L., 2024. Análise da Fragilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão/MG a Partir de Redes Neurais Artificiais. Revista Brasileira de Geografia Física 17, 1060-1074. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1060-1070>
- Rego, L.F.S.M., 2013. Aplicação de índices topográficos e de vegetação no mapeamento digital de solos. Monografia de Graduação em Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília.
- Reis, G.A., Ribeiro, A.J.A., Silva, C.A.U., 2020. Diagnóstico de Vulnerabilidade Socioambiental em Áreas Urbanas Utilizando Inteligência Geográfica. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 13. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/241398/34955>. Acesso: 03 ago 2023. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p767-781>.
- Ribeiro, R.S., Dias, G.P., 2021. Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização de Cataguases (MG): Levantamento do Histórico de Ocupação Territorial e Proposta Para a Expansão Urbana. Anuário do Instituto de Geociências 43, 189-198. DOI: [https://doi.org/10.11137/2020\\_2\\_189\\_198](https://doi.org/10.11137/2020_2_189_198).
- Rocha, L.P., Dourado, F., Silva, A.F., Santos, T.D., 2021. Risco Geológico: Uma Abordagem Integrada entre Métodos de Mapeamento Geotécnico Analisados em Nova Friburgo, RJ. Anuário do Instituto de Geociências 44, 1-18. DOI: [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2021\\_44\\_37686](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_37686).
- Saaty, T.L, 1977. A Scaling method for priorities in hierarquical structures. Journal of Mathematical Psychology 15, 234-281. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](http://dx.doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- Santos, V.S., Nóbrega, A.K.Q., 2017. Análise multicriterial no auxílio de tomada de decisão: estudo de caso no reservatório São Gonçalo, Paraíba. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável [online] 12. Disponível:<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/5476/4858>. Acesso: 20 jul. 2023. DOI: <https://doi.org/10.18378/rvads.v12i5.5476>.
- Schaefer, M., Thinh, N.X., 2019. Evaluation of Land Cover Change and Agricultural Protection Sites: A GIS and Remote Sensing Approach for Ho Chi Minh City, Vietnam. Heliyon 5, 1-14. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01773>.
- Schorn, F.A., Vieira, R., 2023. Análises sobre a ocupação do solo em áreas urbanas de preservação permanentes e suscetíveis à inundação: estudo de caso no Vale do Itajaí, SC. Revista Brasileira de Gestão Urbana 15, 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.015.e20220110>.
- Silva, L.F., Barros, B.G.C., Azevedo, G.F., 2022. Estimativa espacial da profundidade do solo com aplicação em estabilidade de taludes. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais 13, 107-116. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.001.0009>.
- Silva, L.G., Catelani, C.S., Targa, M.S., 2020. Analytic hierarchy process (AHP) applied to flood susceptibility in São José dos Campos, São Paulo, Brazil. Ambiente & Água [online] 15. Disponível: <http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/2293>. Acesso: 02 ago 2023. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2574>.
- Silva, J.F.G., Neto, M.V.B., 2018. Identificação de Riscos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Rio Beberibe - PE. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 11. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234991/30949>. Acesso: 03 ago 2023. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.5.p1709-1720>.
- Sotiropoulou, K.F., Vavatsikos, A.P., 2023. A Decision-Making Framework for Spatial Multicriteria Suitability Analysis using PROMETHEE II and k Nearest Neighbor Machine Learning Models. J Geovis Spat Anal. 7. DOI: [doi:10.1007/s41651-023-00151-3](https://doi.org/10.1007/s41651-023-00151-3).
- Souissi, D., Zouhri, L., Sebei, A., Zghibi, A., Dlala, M., Ghanmi, M., 2023. Urban land suitability analysis using geospatial techniques and combined weighting approach in Gabes zone, Southeastern Tunisia. Geomatics, Natural Hazards and Risk 14, 1-35. DOI: <https://doi.org/10.1080/17513758.2023.2241234>.

- <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2278278>.
- Souza, L.A., Sobreira, F.G., 2015. Procedimentos para elaboração de cartas geotécnicas no planejamento urbano. *Revista Brasileira de Cartografia* [online] 67. Disponível: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44736/23750>. Acesso: 25 jul. 2023. DOI: 10.14393/rbcv67n1-44736.
- Tan, F., Wang, J., Jiao, Y.Y., Ma, B.C., He, L.L., 2021. Suitability evaluation of underground space based on finite interval cloud model and genetic algorithm combination weighting. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 108, 1-15. DOI: doi:10.1016/j.tust.2020.103743.
- Thannoun, R. GH., Ismaeel, O.A., 2024. Flood Risk Vulnerability Detection based on the Developing Topographic Wetness Index Tool in Geographic Information System. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1300, 1-10. DOI 10.1088/1755-1315/1300/1/012012.
- Vasconcelos, V.V., Momm, S., Canil, K., Nogueira, F.R., 2018. Disaster risk management and hydrographic basin analysis: the geotechnical map of suitability for the urbanization of Itapevi – São Paulo, Brazil. *Cad. Metrop.* 20, 371-398. DOI: <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2018-4204>.
- Yang, X., Khan, I., 2022. Dynamics among economic growth, urbanization, and environmental sustainability in IEA countries: The role of industry value-added. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 4116-4127. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16000-z>.
- Zhang, W., Li, H., Han, L., Chen, L., Wang, L., 2022. Slope stability prediction using ensemble learning techniques: A case study in Yunyang County, Chongqing, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 14, 1089-1099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.011>.