

# Análise e mapeamento de suscetibilidade à erosão do perímetro urbano de Rio Verde - GO

Augusto Barbosa Silva

Professor, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, [augusto.silva@ifro.edu.br](mailto:augusto.silva@ifro.edu.br)

Mateus Ribeiro Caetano, Msc.

Doutorando do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, [mateusribeirocaetano@gmail.com](mailto:mateusribeirocaetano@gmail.com)

**RESUMO:** A urbanização desordenada, sem planejamento adequado, impacta negativamente o meio ambiente e promove o desenvolvimento de feições erosivas. O geoprocessamento é um aliado crucial no mapeamento de áreas suscetíveis a erosão. Este estudo elaborou mapas de suscetibilidade à erosão para Rio Verde - GO, cuja urbanização acelerada foi analisada com o software ArcMap e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) via Análise Multicriterial Ponderada. A área urbana foi delimitada por fotointerpretação e vetorização de imagens de alta resolução, considerando uma futura expansão urbana. A caracterização do estudo incluiu variáveis como uso do solo, pedologia, geomorfologia e declividade, integrando dados de múltiplas fontes. Técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento permitiram uma avaliação precisa das áreas em risco, identificando diferentes graus de suscetibilidade à erosão. A análise indicou que as áreas já urbanizadas apresentam baixo risco, enquanto as áreas de expansão têm suscetibilidade predominantemente baixa. Foram identificadas áreas críticas pontuais que exigem atenção especial no planejamento urbano e gestão de recursos naturais. A utilização do SIG e da análise multicriterial mostrou-se eficaz, proporcionando uma base sólida para decisões relacionadas à expansão urbana e conservação do solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Erosão urbana; geoprocessamento; SIG; análise multicriterial; planejamento urbano.

**ABSTRACT:** Unplanned and disordered urbanization negatively impacts the environment and promotes the development of erosive features. Geoprocessing is crucial for mapping erosion-susceptible areas. This study developed erosion susceptibility maps for Rio Verde - GO, where rapid urbanization was analyzed using ArcMap software and Geographic Information Systems (GIS) through a Weighted Multicriteria Analysis. The urban area was delineated using photointerpretation and high-resolution image vectorization, considering future urban expansion. The study's characterization included variables such as land use, pedology, geomorphology, and slope, integrating data from multiple sources. Remote sensing and geoprocessing techniques allowed for precise risk area evaluation, identifying various degrees of erosion susceptibility. The analysis indicated that already urbanized areas present low risk, while expansion areas have predominantly low susceptibility. Critical areas requiring special attention in urban planning and natural resource management were identified. The use of GIS and multicriteria analysis proved effective, providing a solid basis for decisions related to urban expansion and soil conservation.

**KEYWORDS:** Urban erosion; geoprocessing; SIG; multicriteria analysis; urban planning.

## 1 INTRODUÇÃO

A erosão pode ser caracterizada, segundo Carvalho et al (2006), pelos estudos relacionados às ciências da terra, referentes ao desgaste da superfície terrestre por ações providas do vento, da água, do gelo e dos seres vivos, sendo este um fenômeno natural que acaba por gerar materiais detríticos, provenientes da desintegração de partículas de solos e/ou rochas. Apesar de ser um fenômeno natural, a erosão pode ter o seu processo acelerado, principalmente devido à ação antrópica. Neste contexto, as áreas urbanas se destacam pelo favorecimento à progressão de processos erosivos e, tendo em vista o crescimento intenso das cidades brasileiras, se faz necessário monitorar áreas predispostas à ocorrência desse fenômeno.

O processo de urbanização nas últimas décadas promoveu o crescimento desordenado e não planejado de grande parte das cidades brasileiras e, em consequência disso, trouxe impactos negativos relacionados à modificação da dinâmica natural do meio ambiente, que acabam por resultar na formação de feições erosivas (Carvalho & Galvão, 2006). Considerando a ocupação de áreas propensas a este processo, geralmente por pessoas de menor renda que habitam as regiões periféricas das cidades, é essencial identificar condições que permitam avaliar os riscos da ocorrência deste evento.

Uma importante ferramenta para o controle das condições de áreas urbanizadas consiste no mapeamento geológico-geotécnico, que pode fornecer informações relacionadas às áreas suscetíveis à erosão, auxiliando a gestão pública no planejamento e tomadas de decisões mais assertivas (Silveira, 2002).

Neste contexto, a urbanização acelerada em Rio Verde - GO, sem o devido planejamento, tem causado sérios impactos ambientais, incluindo a erosão do solo. Este estudo visa elaborar mapas de suscetibilidade à erosão para fornecer subsídios técnicos ao planejamento urbano sustentável, minimizando os impactos negativos e orientando políticas públicas de conservação ambiental. A combinação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Análise Multicriterial Ponderada (AMP) e sensoriamento remoto permite uma avaliação precisa das áreas em risco, essencial para a gestão eficaz dos recursos naturais.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo consiste no perímetro urbano da cidade de Rio Verde, localizada no sudoeste do estado de Goiás, que possuía uma população calculada em 2022, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de pouco mais que 225 mil habitantes. Esse quantitativo contrasta com a população de pouco mais de uma década atrás, de 176 mil habitantes, em 2010, evidenciando o grande e rápido crescimento dessa cidade.

De acordo com o Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos (IMB), a cidade é abastecida pelas bacias hidrográficas do Rio Paranaíba e do Rio dos Bois, contando principalmente com os rios de Rio Verde (ou Verdão), Rio Verdinho, Rio São Tomás e Rio Doce. Ainda segundo o referido instituto, a cidade possui relevo caracterizado como plano levemente ondulado, tendo como características do ecossistema o cerrado e matas residuais.

### 2.2 Aspectos metodológicos

A elaboração de mapas de suscetibilidade à erosão contou com o auxílio de técnicas de SIG aplicadas ao método de Análise Multicriterial Ponderada, tendo sido executado de acordo com as seguintes fases:

1ª fase – Delimitação da área de ocupação urbana: realizada por meio de fotointerpretação e vetorização de imagens de alta resolução do Google Earth, tendo gerado um arquivo que foi convertido ao formato Shapefile, formato padrão de trabalho do software ArcMap.

2ª fase – Previsão de expansão da área de ocupação urbana: tendo em vista a constante urbanização, foi prevista uma margem significativa de potencial expansão, pela aplicação da ferramenta buffer, com limite linear de 3 km além do atual perímetro ocupado, tendo sido gerado o perímetro total utilizado neste estudo.

3ª fase – Obtenção de dados relevantes à análise de suscetibilidade: foi realizado o levantamento de materiais e bases de dados cartográficas referentes às características da cidade de Rio Verde, sendo considerados tais aspectos: declividade, pedologia, geomorfologia e uso e ocupação do solo. Para os dados de declividade, recorreu-se à base de dados do satélite Alos Palsar, sendo extraído o Modelo Digital de Elevação (MDE), com o plano cartográfico do Estado de Goiás, na escala 1:50.000. Os dados de pedologia e geomorfologia foram obtidos a partir do BDIA IBGE, com escala de 1:250.000, enquanto, para o aspecto de uso e ocupação do solo, os dados foram obtidos a partir de imagens do Sentinel, com resolução espacial de 10 m, na escala de 1:250.000. O corte topográfico necessário para este estudo foi o da Folha SE 22-X-C, onde se encontra o perímetro urbano de Rio Verde.

4ª fase – Produção de mapas temáticos: os mapas temáticos relativos a cada aspecto analisado (declividade, pedologia, geomorfologia e uso e cobertura de solo) foram elaborados pela inserção das bases cartográficas citadas no ambiente GIS/ArcGIS, havendo a conversão dos dados vetoriais para o formato raster.

A definição das condições de relevo foi realizada a partir do MDE do terreno, que gerou o mapa de declividade da área, enquanto os mapas de pedologia e geomorfologia foram extraídos partir da base cartográfica do BDIA IBGE. Para o aspecto de uso e ocupação do solo, foram utilizados os dados de imagens do Sentinel, sendo usadas 3 bandas (3, 4 e 8) que possibilitaram gerar uma imagem de falsa cor, sendo a partir delas realizada uma composição RGB (Red-Green-Blue) e posterior classificação interativa supervisionada a fim de caracterizar os elementos nela contidos.

5ª fase – Aplicação da análise multicriterial ponderada: foi realizada a aplicação da análise multicriterial ponderada que, a exemplo do estudo de Santos et. al (2022), combina um conjunto de mapas, com determinados aspectos, gerando um mapa de saída. Assim, os mapas temáticos aqui dispostos foram combinados a fim de gerar o mapa final de suscetibilidade à erosão.

Para a aplicação da análise multicriterial, foi necessário atribuir pesos a cada atributo dos mapas, processo chamado de reclassificação, consistindo na transformação dos atributos de cada mapa para formato de valor único, a fim de representar cada feição. Ao definir o peso de cada feição dos mapas, foi atribuído um valor entre 1 e 5, sendo 5 o valor utilizado em feições consideradas muito suscetíveis ao processo erosivo, decrescendo até o valor 1, utilizado nas feições cuja suscetibilidade era considerada baixíssima. Para a atribuição desses pesos, foram adotados critérios que relacionassem o desempenho das características ao favorecimento ou não de processos erosivos, de modo que o peso seria mais alto à medida que houvesse maior interferência dessas características às ocorrências de erosões.

Considerando o mapa de declividade, foram adotados os pesos de forma crescente, à medida que a declividade aumentasse, recebendo o peso 1 a declividade entre 0 a 3,0% até o peso 5 para a declividade entre 25,01 e 45,0%.

No mapa pedológico, o critério foi considerado em função do fator de erodibilidade (K) das feições encontradas na área estudada, sendo Latossolo Vermelho Distrófico (K = 0,0061), Latossolo Vermelho Ácrico (K = 0,0263) e Latossolo Vermelho Acriférrico (K = 0,0085), valores definidos em estudos de Mannigel et al. (2002). Por meio deste importante fator, os referidos autores permitiram a associação da propensão à erodibilidade do solo em função de K, cujos valores corresponderam a 5 para maior propensão de erodibilidade e valores decrescentes conforme essa menor propensão.

Para o mapa de geomorfologia, a atribuição de pesos foi realizada considerando a comparação do grau de dissecação disposto nas bases de dados cartográficos, considerando as feições encontradas na região: Planaltos Residuais do Interior da Bacia Sedimentar do Paraná (dissecação homogênea muito fraca), Chapadão do Rio Verde - Alto Garças (dissecação homogênea fraca) e Superfície de Acreúna – Itumbiara (dissecação homogênea média). Dessa maneira, foi atribuído peso 3 para a dissecação média, peso 2 para a dissecação fraca e peso 1 para a dissecação muito fraca.

Por fim, a atribuição de pesos às feições do mapa de uso e ocupação do solo se deu de modo interpretativo, com pesos maiores para características favoráveis ao processo erosivo: 5 para o solo exposto (sem cobertura), 3 para vegetação rasteira/gramínea e para o meio urbano e 1 para vegetação e água. Considerando os critérios relatados, a Tabela 1 sintetiza os pesos atribuídos às respectivas feições.

Tabela 1. Atribuição de peso às respectivas feições.

| Declividade   |      | Uso e cobertura do solo |      | Pedologia                             |      | Geomorfologia   |      |
|---------------|------|-------------------------|------|---------------------------------------|------|---|------|
| Feição        | Peso | Feição                  | Peso | Feição                                | Peso | Feição  | Peso |
| 0 – 3,0 %     | 1    | Urbano                  | 3    | LVd - Latossolo Vermelho Distrófico   | 1    | Planaltos Residuais do Interior da Bacia Sedimentar do Paraná | 1    |
| 3,01 – 8,0 %  | 2    | Solo sem cobertura      | 5    | LVw - Latossolo Vermelho Ácrico       | 3    | Chapadão do Rio Verde - Alto Garças                           | 2    |
| 8,01 – 13,0 % | 3    | Água                    | 1    | LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico | 1    | Superfície de Acreúna - Itumbiara                             | 3    |
| 13,01 – 25 %  | 4    | Vegetação               | 1    |                                       |      |   |      |
| 25,01 – 45 %  | 5    | Vegetação rasteira      | 3    |                                       |      |   |      |

Feita a reclassificação dos mapas, tendo em vista o peso atribuído às feições, a análise multicriterial foi aplicada para a combinação deste conjunto de mapas, sendo o seu cruzamento por meio da atribuição de uma porcentagem de relevância a cada mapa. Neste sentido, como realizado por

Pereira (2021), os pixels da imagem raster de saída recebem um valor calculado pela média ponderada dos valores dos pixels de entrada, que considera o peso adotado nas feições de cada mapa, assim como a porcentagem de relevância de cada mapa quanto à maior ou menor suscetibilidade. Nesse contexto, os percentuais a serem adotados podem divergir conforme a individualidade de cada análise, gerando um mapa de suscetibilidade à erosão distinto a cada porcentagem adotada, dando maior liberdade de interpretações.

Esta pesquisa considerou o uso de 8 cenários distintos (Tabela 2), com adoção de distintas porcentagens de relevância, cuja aplicação de múltiplos cenários permite capturar a variabilidade dos fatores avaliados e proporciona uma análise mais robusta e abrangente. Destaca-se a importância de se considerar diferentes cenários e pesos para integrar múltiplos fatores de risco, conforme discutido em outros trabalhos, onde constata-se que a consideração de diferentes cenários melhora significativamente a precisão das previsões, reforçando a relevância de abordagens multicritério com múltiplos cenários (Kayastha *et al.*, 2013; Hosseinalizadeh *et al.*, 2019; Costache *et al.*, 2020).

Tabela 2 – Adoção de pesos considerando diferentes cenários.

| Influência do mapa             | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 | Cenário 4 | Cenário 5 | Cenário 6 | Cenário 7 | Cenário 8 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Declividade</b>             | 25%       | 35%       | 35%       | 20%       | 40%       | 30%       | 30%       | 20%       |
| <b>Pedologia</b>               | 25%       | 35%       | 20%       | 35%       | 30%       | 40%       | 20%       | 20%       |
| <b>Geomorfologia</b>           | 25%       | 10%       | 10%       | 10%       | 10%       | 10%       | 10%       | 40%       |
| <b>Uso e cobertura do solo</b> | 25%       | 20%       | 35%       | 35%       | 20%       | 20%       | 40%       | 20%       |

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a influência estimada para os mapas em cada um dos cenários, foram gerados os mapas de saída correspondentes à suscetibilidade à erosão do perímetro urbano de Rio Verde (Figuras 1, 2, 3 e 4).

No primeiro cenário, identificou-se que a maior parte da área é pouco vulnerável à erosão, considerando que 84% dela possui baixa ou muito baixa suscetibilidade à erosão, quase 16% de suscetibilidade média e 0,02% de suscetibilidade alta. A maior parte da área com média suscetibilidade encontra-se ainda não ocupada pela urbanização, o que possibilita que seja feito um planejamento de exclusão dessa área, caso se aceite esse risco como considerável.

No segundo cenário, 92% da área é pouco ou muito pouco vulnerável à erosão, quase 8% têm suscetibilidade média e 0,08% possuem alta suscetibilidade. Grande parte das áreas com média suscetibilidade, assim como as áreas de alta suscetibilidade, não são urbanizadas atualmente, e podem ser rejeitadas para urbanização em um planejamento futuro, a depender dos critérios de risco aceitável.

No terceiro cenário, nota-se uma incidência considerável de áreas com média suscetibilidade, totalizando 31% da área total, enquanto pouco mais de 68% da área é pouco ou muito pouco suscetível, e 0,5% da área possui alta suscetibilidade à erosão. Grande parte das áreas com média ou alta suscetibilidade não são urbanizadas, e podem ser destacadas para maiores estudos em uma potencial expansão da área urbana. Enquanto isso, no quarto cenário, destacam-se as áreas altamente suscetíveis à erosão, localizadas nas extremidades do mapa, e que detêm uma parcela de 0,3% da área total. Pouco mais de 71% da área possui baixa ou muito baixa vulnerabilidade à erosão, enquanto apresenta cerca de 28% de suscetibilidade média.

No quinto cenário, mais de 90% da área possui baixa ou muito baixa suscetibilidade, sendo menos de 8% da área de média suscetibilidade e menos de 0,08% dela possuindo alta suscetibilidade à erosão, enquanto no sexto cenário quase a totalidade da área (94%) é pouco ou muito pouco vulnerável à erosão, com área de média vulnerabilidade de quase 6% e alta vulnerabilidade na ordem de 0,06%.

No sétimo cenário, se encontram os maiores percentuais de média (34%) e alta suscetibilidade (0,9%) à erosão dentre todos os casos, enquanto 65% da área é pouco ou muito pouco suscetível.



Outro importante destaque observado neste cenário se deve ao fato de haver identificação de áreas de alta suscetibilidade já ocupadas, o que representa um risco para seus ocupantes e serve de alerta para os gestores públicos. Apesar disso, mesmo neste cenário mais desfavorável, a maior parte da área já ocupada pela urbanização está alocada em local com 86,4% de baixa ou muito baixa suscetibilidade, 13,3% média suscetibilidade e apenas 0,3% de alta suscetibilidade, demonstrando que é uma área relativamente pouco propensa à erosão.

No oitavo cenário, não há nenhuma área que tenha alta suscetibilidade à erosão, tendo cerca de 10% de média suscetibilidade e cerca de 90% de baixa ou muito baixa suscetibilidade.

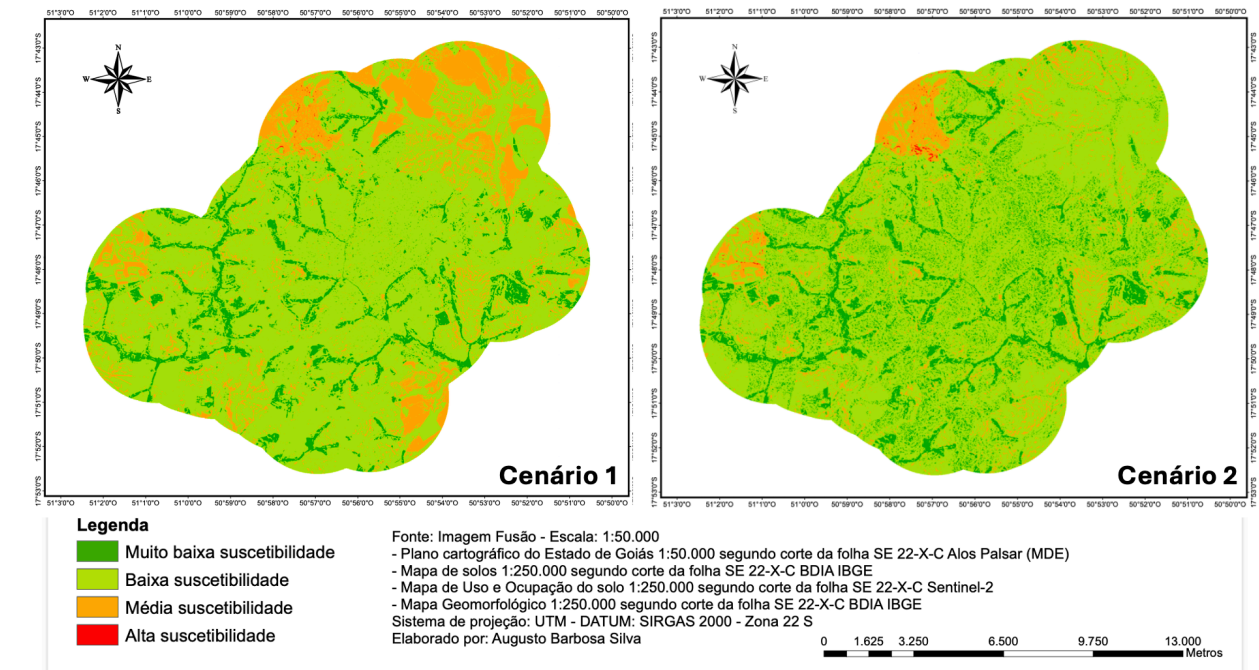


Figura 1 – Mapas de suscetibilidade à erosão de Rio Verde – GO (Cenários 1 e 2).

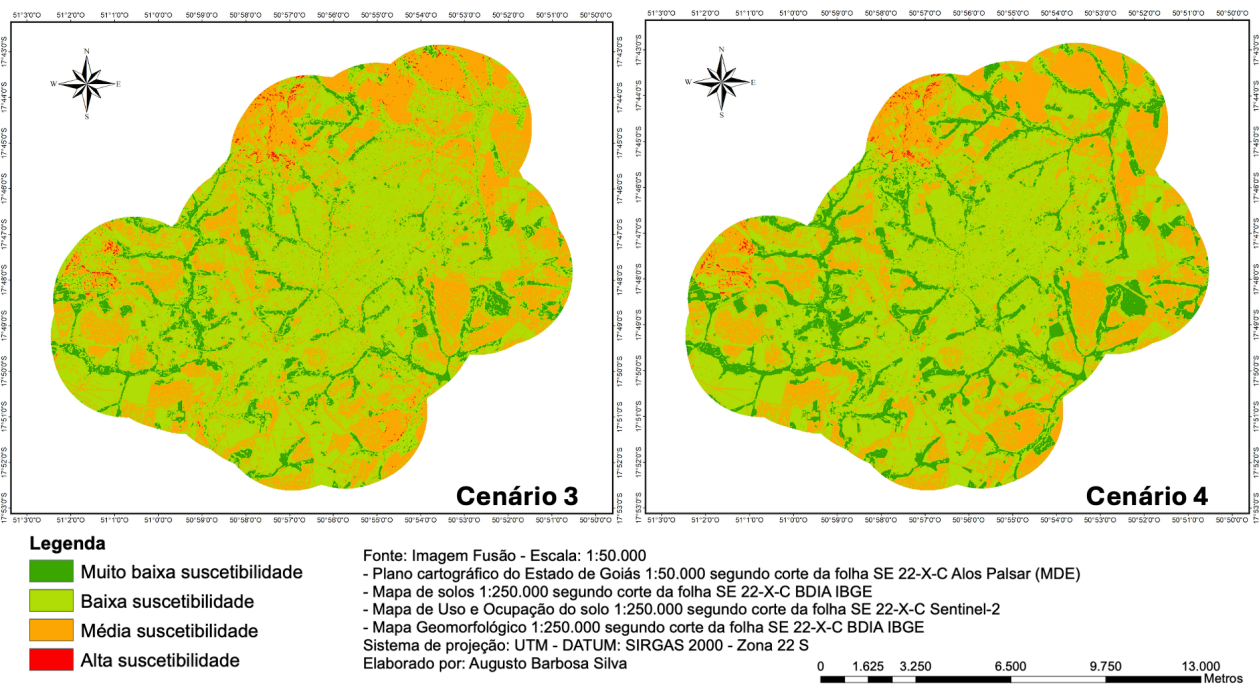


Figura 2 – Mapas de suscetibilidade à erosão de Rio Verde – GO (Cenários 3 e 4).

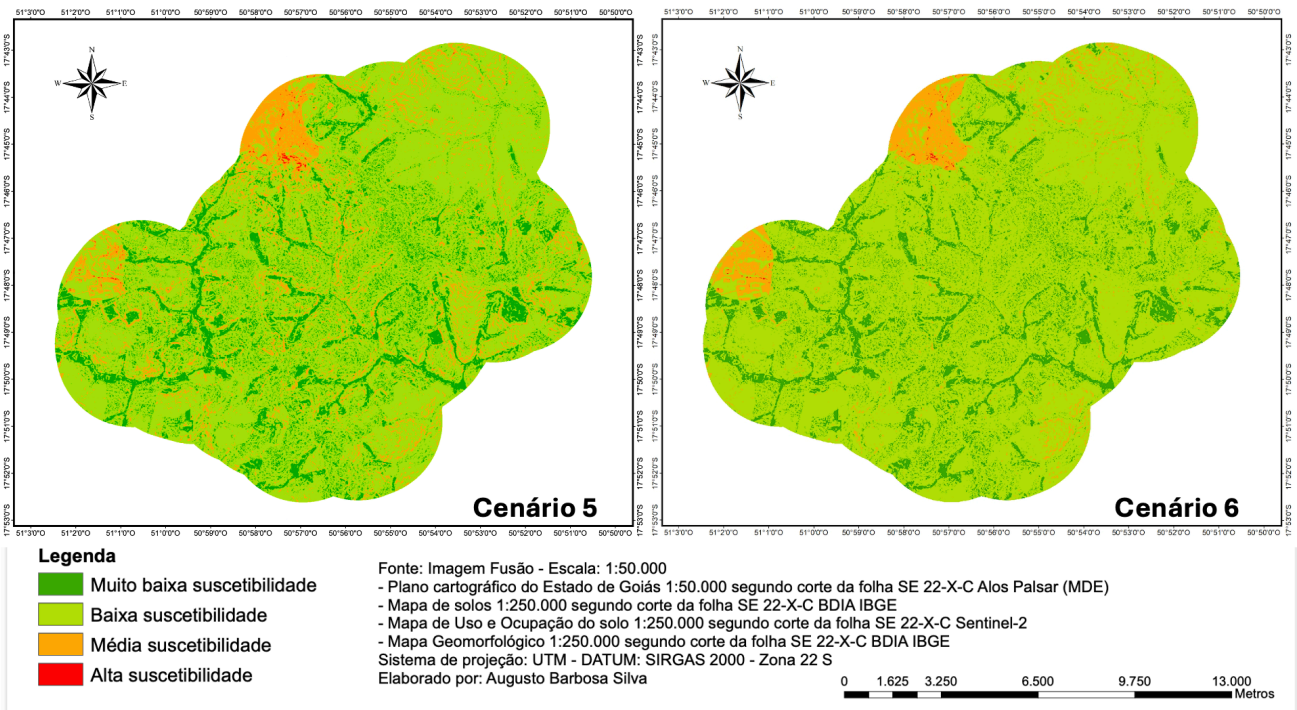


Figura 3 – Mapas de suscetibilidade à erosão de Rio Verde – GO (Cenários 5 e 6).

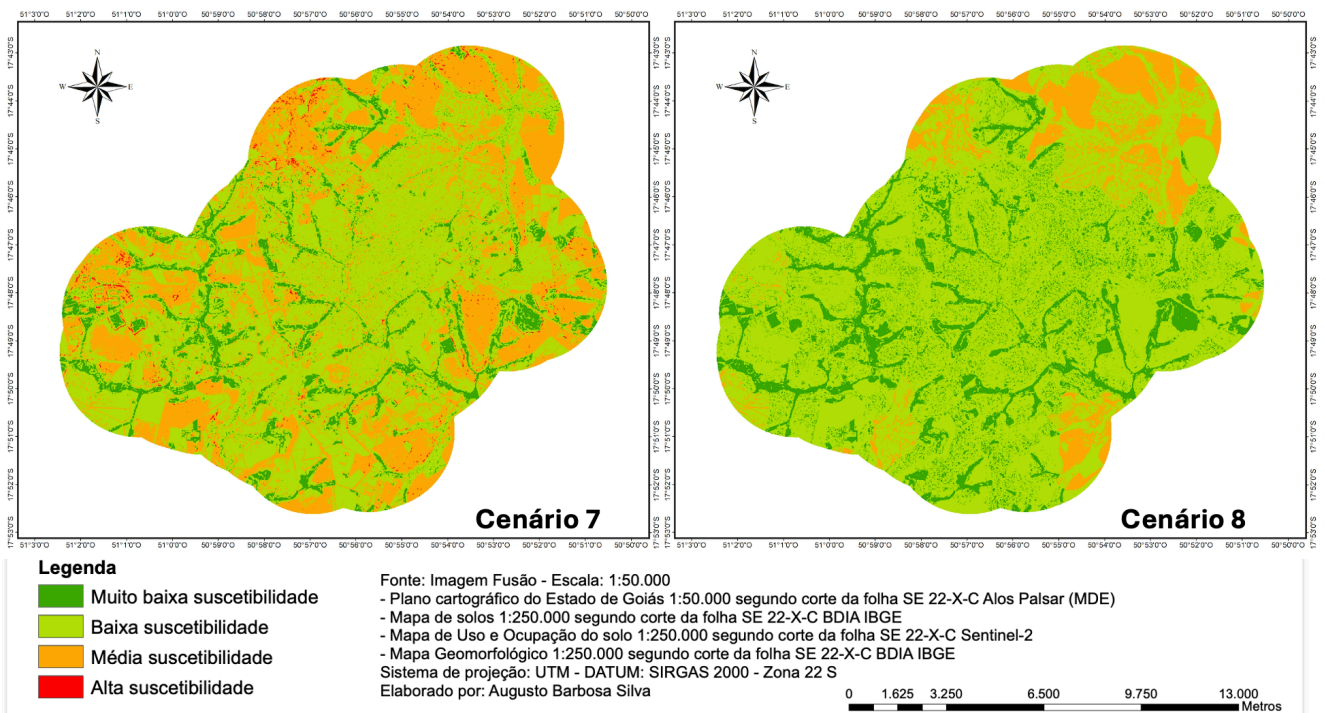


Figura 4 – Mapas de suscetibilidade à erosão de Rio Verde – GO (Cenários 7 e 8).

A partir dos mapas de saída, depreende-se claramente que a maior ou menor influência de determinados mapas temáticos acaba por gerar mapas de suscetibilidade à erosão bastante distintos, reforçando a necessidade de se realizar uma análise criteriosa, que contenha profissionais multidisciplinares, detidos de conhecimento sólido acerca dos aspectos específicos a serem avaliados para a combinação dos mapas.



Com relação às áreas previstas para expansão da urbanização neste estudo, uma região (Figura 5) se destacou por, independentemente da influência escolhida para os mapas temáticos, sempre apresentar grau de média a alta suscetibilidade à erosão, o que a torna possivelmente restrita à ocupação, dado o risco previsto.

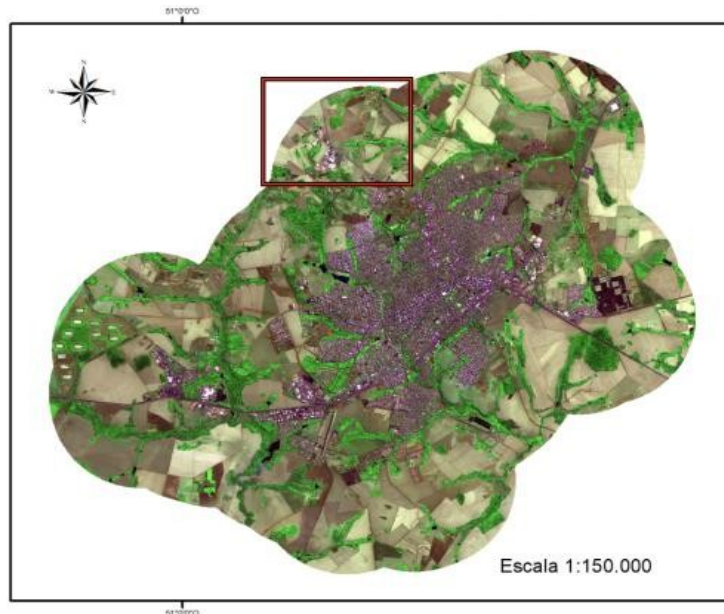


Figura 5 – Área destacada por características comuns a todos os cenários.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os dados apresentados, infere-se que, mesmo considerando o cenário mais propenso ao desenvolvimento de feições erosivas, a área analisada possui uma segurança razoável, uma vez que não houve registros de áreas com muito alta suscetibilidade, e as áreas com alta suscetibilidade não chegaram nem a 1% da área total analisada. Contudo, ressalta-se que essa minoria de áreas deve ser considerada em qualquer estudo utilizado para o planejamento urbano.

Neste estudo, foi possível identificar uma região que apresenta média suscetibilidade em todos os estudos de caso, considerando diferentes influências entre os mapas temáticos. Em alguns dos estudos de caso, essa região apresenta também alta suscetibilidade em alguns pontos, devendo ser alvo de maiores estudos e podendo ser restrita ou limitada à ocupação urbana.

Com relação à área já ocupada pela urbanização, demonstrou-se que a área urbana possui muita segurança contra desenvolvimento de processos erosivos, haja vista sua baixa e muito baixa suscetibilidade em sua maior parte. Apesar disso, considerando o estudo de caso mais favorável ao desenvolvimento de feições erosivas, este estudo indicou, mesmo que pouco (0,3% da área urbanizada), a presença de áreas de alta suscetibilidade já ocupadas. Dessa maneira, tais áreas devem servir de alerta à gestão municipal, para que haja o monitoramento de suas condições e possíveis intervenções.

Assim, os mapas de suscetibilidade à erosão revelaram que as áreas urbanizadas de Rio Verde apresentam baixo risco, enquanto as regiões de expansão têm, predominantemente, baixa suscetibilidade. No entanto, foram identificadas áreas críticas que exigem atenção especial. A aplicação de SIG e AMP mostrou-se eficaz, fornecendo uma base sólida para decisões sobre expansão urbana e conservação do solo para esta cidade analisada.

Os oito cenários gerados permitiram identificar consistentemente áreas com diferentes níveis de suscetibilidade à erosão, sob diferentes perspectivas, crucial para planejar a expansão urbana de forma a evitar áreas de alto risco, promovendo um desenvolvimento urbano sustentável. A partir disso, as áreas de expansão urbana poderão ser direcionadas para regiões com baixa suscetibilidade à erosão, reduzindo os impactos ambientais e os custos associados à mitigação de riscos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carvalho, J. C., Sales, M. M., Sousa de, N. M., Melo, M. T. S. (2006). Processos Erosivos no Centro-oeste Brasileiro. Brasília: Finatec.
- Carvalho, C. S., Galvão, T. (2006). Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais. Ministério das Cidades: Cities Alliance. Brasília.
- Costache, R., Pham, Q.B., Avand, M., et al. (2020). Novel hybrid models between bivariate statistics, artificial neural networks and boosting algorithms for flood susceptibility assessment. *Journal of Environmental Management*, 265.
- Google. (2023). Google Earth [Software]. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>.
- Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Chen, W., et al. (2019). Gully headcut susceptibility modeling using functional trees, naïve Bayes tree, and random forest models. *Geoderma*.
- IBGE. (2022). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Censo Demográfico 2022: Características da população e dos domicílios. Rio de Janeiro.
- IMB. (2023). Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos - Banco de dados estatísticos de Goiás. Goiânia.
- Kayastha, P., Dhital, M.R., & De Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, West Nepal. *Computers & Geosciences*, 52, 398-408.
- Mannigel, A. R., Carvalho, M. P., Moreti, D., Medeiros, L. R. (2002). Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 24, 1335-1340.
- Pereira, C. W. H. S. (2021). O uso da Análise Multicritério como ferramenta para a formulação de projetos de reabilitação de áreas urbanas degradadas. Universidade Federal de Ouro Preto (Dissertação de mestrado).
- Santos, T. G., Ferreira, A. B. R., Ventorini, S. E., Zacharias, A. A., Teixeira, A. L. (2022). Análise Multicriterial de Decisão aplicada às áreas suscetíveis à inundação na bacia do córrego do Lenheiro – São João Del-Rei, Minas Gerais. *GEOgraphia*, 24(53), 1-16.
- Silveira, L. L. L. (2002). Elaboração de carta de susceptibilidade à erosão das bacias dos rios Araraquara e Cubatão-SP, escala 1:50.000. Universidade de São Paulo, São Carlos – SP (Dissertação de Mestrado).