

MAPEAMENTO DO POTENCIAL ESPELEOLÓGICO DO SETOR ORIENTAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG ATRAVÉS DE ABORDAGEM INDUTIVA

Felipe Silva Guimarães¹

Roberta Borges Parreira²

Justine Margarida Magela Martins Bueno³

RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero (MG) concentra importantes recursos minerais e grande quantidade de cavidades naturais, o que intensifica os conflitos entre a atividade minerária e a conservação do patrimônio espeleológico. Nesse contexto, o mapeamento do potencial espeleológico constitui uma importante ferramenta para o planejamento ambiental e para direcionar campanhas de prospecção espeleológica. Este trabalho teve como objetivo elaborar um mapa de potencial espeleológico para o setor leste do Quadrilátero Ferrífero a partir de uma abordagem indutiva, utilizando o algoritmo MaxEnt. Para a modelagem foram utilizados 850 registros de cavidades provenientes do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE). Como variáveis preditoras, foram utilizados descritores geomorfométricos, variáveis de distância (em relação a contatos geológicos, falhas e rede de drenagem) e os litotipos. A validação por meio da curva ROC indicou elevada acurácia do modelo ($AUC = 0,92$), evidenciando forte correspondência entre as áreas de alto potencial e a ocorrência de cavidades. A geologia destacou-se como a variável mais importante, enquanto as demais contribuíram para o refinamento espacial do modelo dentro das unidades litológicas. As classes de maior potencial representam apenas 2% da área de estudo, mas concentram cerca de 50% das cavidades registradas.

Palavras-chave: Modelo de potencial espeleológico; Descritores geomorfométricos; MaxEnt.

INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado na porção centro-sudeste de Minas Gerais, constitui uma das mais importantes províncias minerais do mundo, com destaque para a produção de minério de ferro, ouro e manganês (DORR, 1969). Além de sua relevância econômica, a região abriga um significativo patrimônio espeleológico, com cavidades naturais desenvolvidas principalmente em itabiritos, cangas ferruginosas e, secundariamente, em quartzitos (AULER & PILÓ, 2005; TIMO & TIMO, 2016).

¹ Doutor pelo curso de geografia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), felipe.guimaraes@amploengenharia.com.br

² Mestre pelo Curso de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, roberta.parreira@amploengenharia.com.br

³ Mestre pelo Curso de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, justine.bueno@amploengenharia.com.br

No Brasil iniciativas de mapeamento em escala nacional, como o trabalho de Jansen *et al.* (2012), baseiam-se predominantemente em critérios litológicos e apresentam caráter generalista, compatível com escalas pequenas (1:2.500.000). Embora fundamentais como diretriz, tais estudos apresentam limitações para aplicações em escalas de maior detalhe, como aquelas referidas em estudos ambientais e projetos minerários no QF. Em escalas mais detalhadas, a simples reclassificação litológica mostra-se insuficiente para explicar a distribuição espacial das cavidades, uma vez que fatores estruturais, geomorfológicos e hidrológicos também exercem papel determinante em sua gênese e evolução dos sistemas subterrâneos (ABREU *et al.* 2016 e LARANJEIRA, 2021).

Tradicionalmente, os mapas de potencial espeleológico têm sido desenvolvidos por abordagens dedutivas, baseadas em análise de multicritérios, com atribuição de pesos às variáveis (BONHAM-CARTER, 1994). Contudo, tais abordagens apresentam desafios relacionados à subjetividade inerente à ponderação dos critérios e atributos, bem como da forma de discretização das variáveis contínuas. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo elaborar um mapa de potencial espeleológico para o setor oriental do Quadrilátero Ferrífero por meio de uma abordagem indutiva, utilizando o algoritmo MaxEnt, a partir da integração de variáveis geomorfométricas e categóricas.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde ao setor oriental do Quadrilátero Ferrífero, inserido no contexto geotectônico do Cráton do São Francisco, sendo caracterizada por uma complexa associação de unidades arqueanas e proterozóicas. A estruturação geológica é fortemente controlada por grandes dobras regionais, falhas inversas e zonas de cisalhamento, resultantes principalmente do evento Transamazônico (Paleoproterozoico), que condicionam a orientação das cristas e vales e influenciam diretamente a circulação de fluidos e o desenvolvimento de cavidades (DORR, 1969; ALKMIM & MARSHAK, 1998). A região apresenta relevo fortemente dissecado, com escarpas estruturais, cristas alongadas e vales encaixados, refletindo o controle estrutural e litológico sobre a evolução do relevo (BARBOSA & RODRIGUES, 1967).

Sob a perspectiva socioeconômica, no setor oriental, concentram-se importantes complexos minerários operados por empresas como Vale S.A., AngloGold Ashanti e CSN Mineração. A intensa atividade minerária resulta em forte pressão sobre o patrimônio espeleológico, sobretudo em áreas de ocorrência de cangas e itabiritos, onde há significativa sobreposição entre jazidas minerais e zonas de alto potencial espeleológico (AULER & PILÓ, 2005).

MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem de potencial espeleológico foi realizada através do algoritmo MaxEnt (*software* MaxEnt versão 3.4.4, Phillips, 2006). O MaxEnt, ou *Maximum Entropy*, é uma técnica de modelagem estatística frequentemente utilizada em aprendizado de máquina. Este algoritmo baseia-se no princípio da entropia máxima, buscando encontrar a distribuição de probabilidade mais uniforme dadas as restrições impostas pelos dados observados. Além disso, a capacidade do MaxEnt de lidar com conjuntos de dados reduzidos ou desbalanceados é valiosa ao tratar de observações limitadas (EL-GABBAS & DORMANN, 2018; MCCARTNEY *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2020) como pode ser o caso de algumas áreas com poucos dados de registros de cavidades ou que eles estejam concentrados em algumas regiões.

A entrada do modelo é composta por duas categorias de dados: 1. Os registros, que neste caso são entendidos como as coordenadas das cavidades; e 2. As variáveis preditoras. Os registros foram obtidos pelo Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), considerando os dados disponíveis em outubro de 2025. Para a AE (domínio de modelagem), foram levantados nesta base de dados 850 registros dos quais 595 (70%) foram utilizados para treino do modelo e os demais para sua validação (teste). As variáveis preditoras empregadas pertencem a dois tipos, sendo eles: 1. Descritores geomorfométricos; 2. Variáveis de distância e 3. Geologia.

Os descritores geomorfométricos foram derivados do processamento, no *software* SAGA GIS, de um modelo digital de terreno (MDT) com resolução espacial de 5 metros resultante de aerolevantamentos com LIDAR fornecidos pela Amplo Engenharia e Gestão de Projetos. Foram utilizados os seguintes descritores geomorfométricos: Profundidade do vale, Stream power index (SPI), Fator LS, Declividade, geomorphons, posição relativa na vertente, Distância vertical para a rede de drenagem (DVRD), índice de balanço de massa e Topographic wetness index (TWI).

Foram utilizadas três variáveis de distância, calculadas em ambiente SIG através do método da distância euclidiana a partir das feições. São elas: Distância para contatos geológicos, Distância para falhas geológicas e Distância para a rede de drenagem. Os dois primeiros foram obtidos a partir das bases vetoriais das folhas geológicas do Projeto Quadrilátero Ferrífero, na escala 1:50.000. Já a rede hidrográfica foi extraída do MDT para garantir o máximo de coerência e ajuste entre os cursos d'água e as variáveis geomorfométricas. A litologia (Geologia) também foi obtida a partir das folhas do Projeto Quadrilátero Ferrífero, na escala 1:50.000.

A validação do modelo foi realizada com a curva ROC (Característica Operativa do Receptor), onde a área abaixo da curva (AUC) indica a probabilidade de que o modelo seja diferente do esperado

por uma distribuição aleatória (FIELDING & BELL, 1997). Valores de AUC próximos de 0,5 indicam que a predição do modelo não é melhor do que a de um modelo produzido aleatoriamente. Valores mais próximos de 1 indicam, em geral, modelos mais acurados. A literatura tem considerado, frequentemente, 0,7 como limiar de corte para a validação dos modelos derivados do algoritmo MaxEnt (SWEETS, 1988; BUISSON et al, 2010; PHILLIPS, 2017; SALVADOR JUNIOR, 2021; BRITO, 2023). Além disso, o modelo passou por validação visual ao sobrepor os registros de cavidades ao mapa resultante e ao avaliar a coerência espacial da distribuição das zonas de maior e menor potencial espeleológico no recorte estudado.

Por fim, foi avaliada a importância de cada variável preditora para o ganho e acurácia do modelo através do teste de Jackknife.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Tôrres (2010), modelos que apresentam elevada performance são indicados por grandes áreas sob a curva ROC. Normalmente, valores de AUC entre 0.5 e 0.7 sugerem baixa acurácia, valores entre 0.7 e 0.9 indicam resultados úteis para aplicações e valores acima de 0.9 demonstram alta acurácia. A AUC calculada para o modelo foi igual a 0,92, o que atesta sua elevada acurácia. De maneira geral, este resultado indica que as cavidades estão associadas a áreas indicadas pelo modelo como de alto potencial espeleológico.

Os Gráfico 1 e Gráfico 2 mostram os resultados do teste de Jackknife. Observa-se que a variável que mais contribuiu para o ganho e acurácia do modelo quando usada isoladamente é a Geologia. O Gráfico 2 mostra que se o modelo fosse elaborado apenas com a variável Geologia, seu valor de AUC seria, aproximadamente, de 0,82, apenas 0,10 menor que utilizando todas as variáveis. Este resultado destaca a importância da litologia para a avaliação do potencial espeleológico e coloca as demais variáveis como acessórias, mas que contribuem para o refinamento do modelo, permitindo identificar setores de diferentes faixas de potencial espeleológico na mesma unidade geológica.

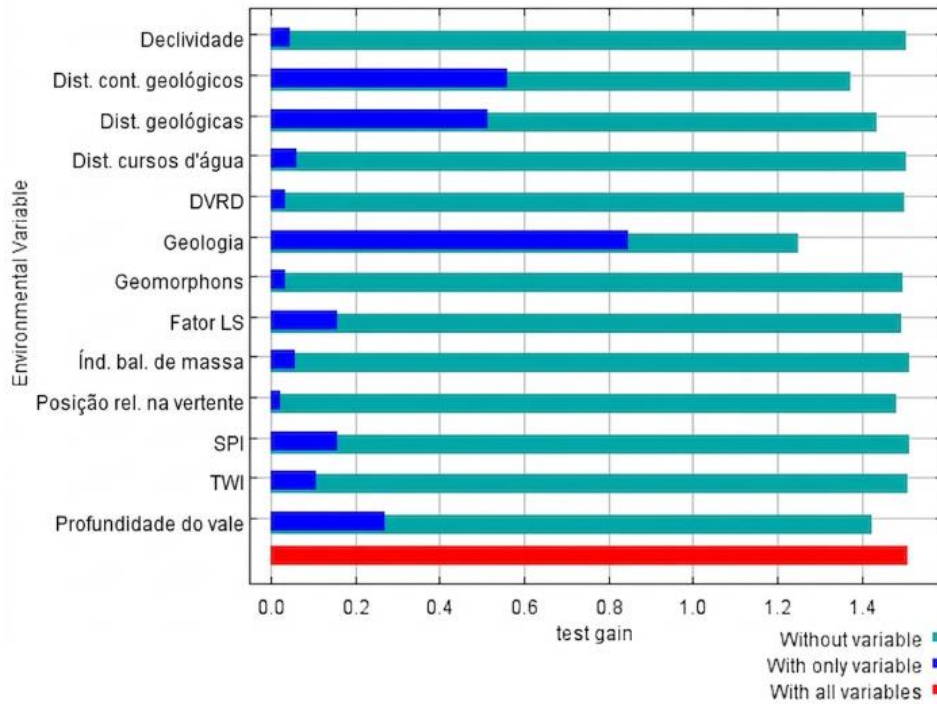


Gráfico 1: Resultado do teste de Jackknife a partir das amostras de teste para o ganho do modelo

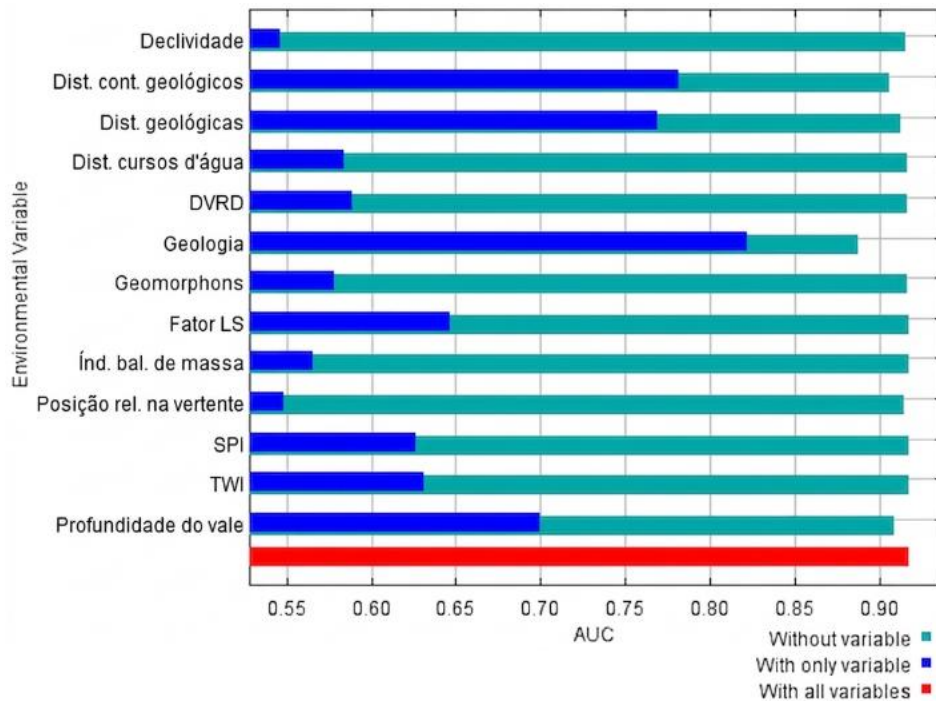


Gráfico 2: Resultado do teste de Jackknife a partir das amostras de teste para a acurácia do modelo



1º HIDROGEOMINAS

SIMPÓSIO MINEIRO DE
HIDROGEOMORFOLOGIA
E RECURSOS HÍDRICOS

07 - 10 de setembro de 2026
Departamento de Geografia - UFMG
Belo Horizonte - MG

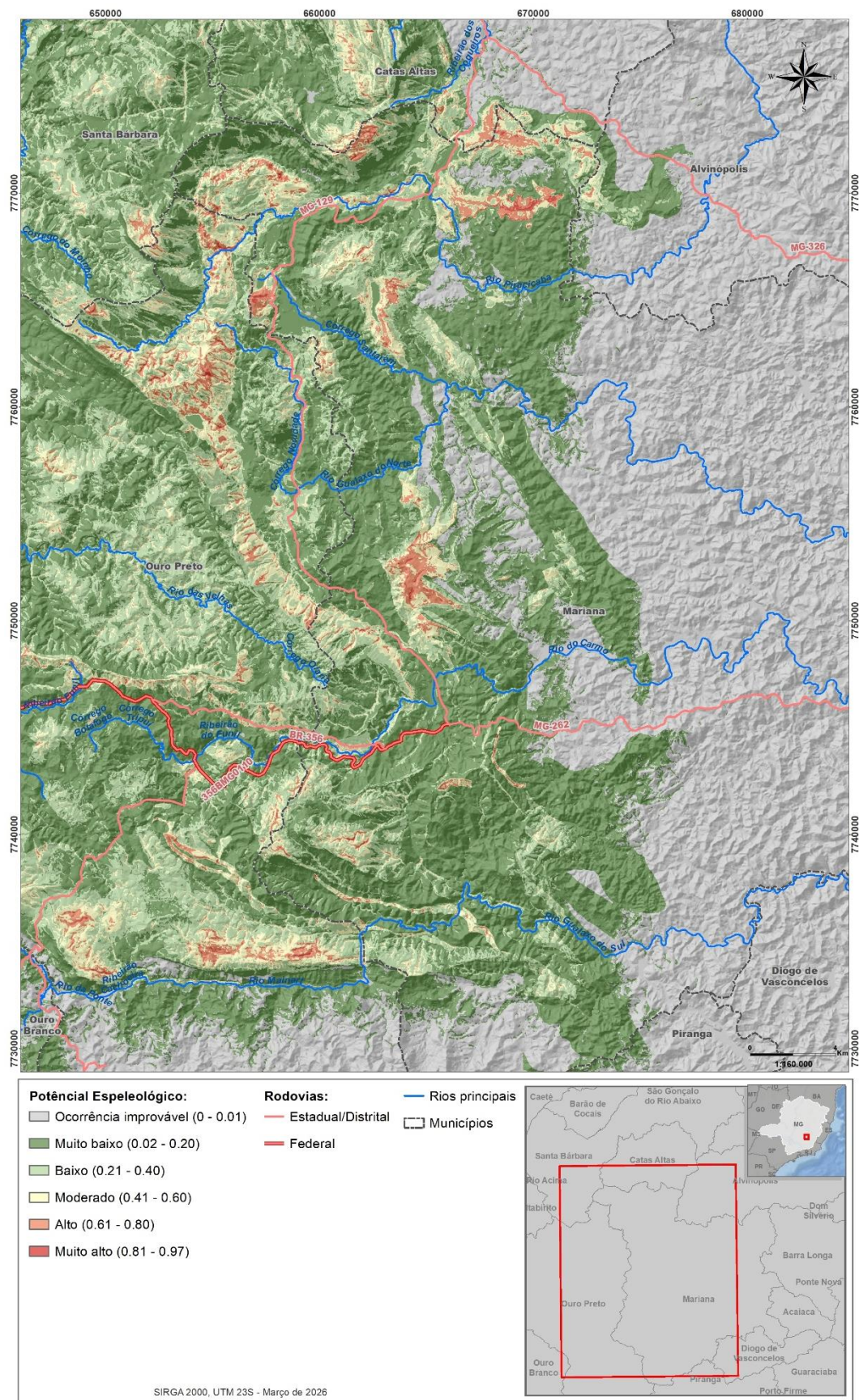


Figura 1: Mapa de potencial espeleológico

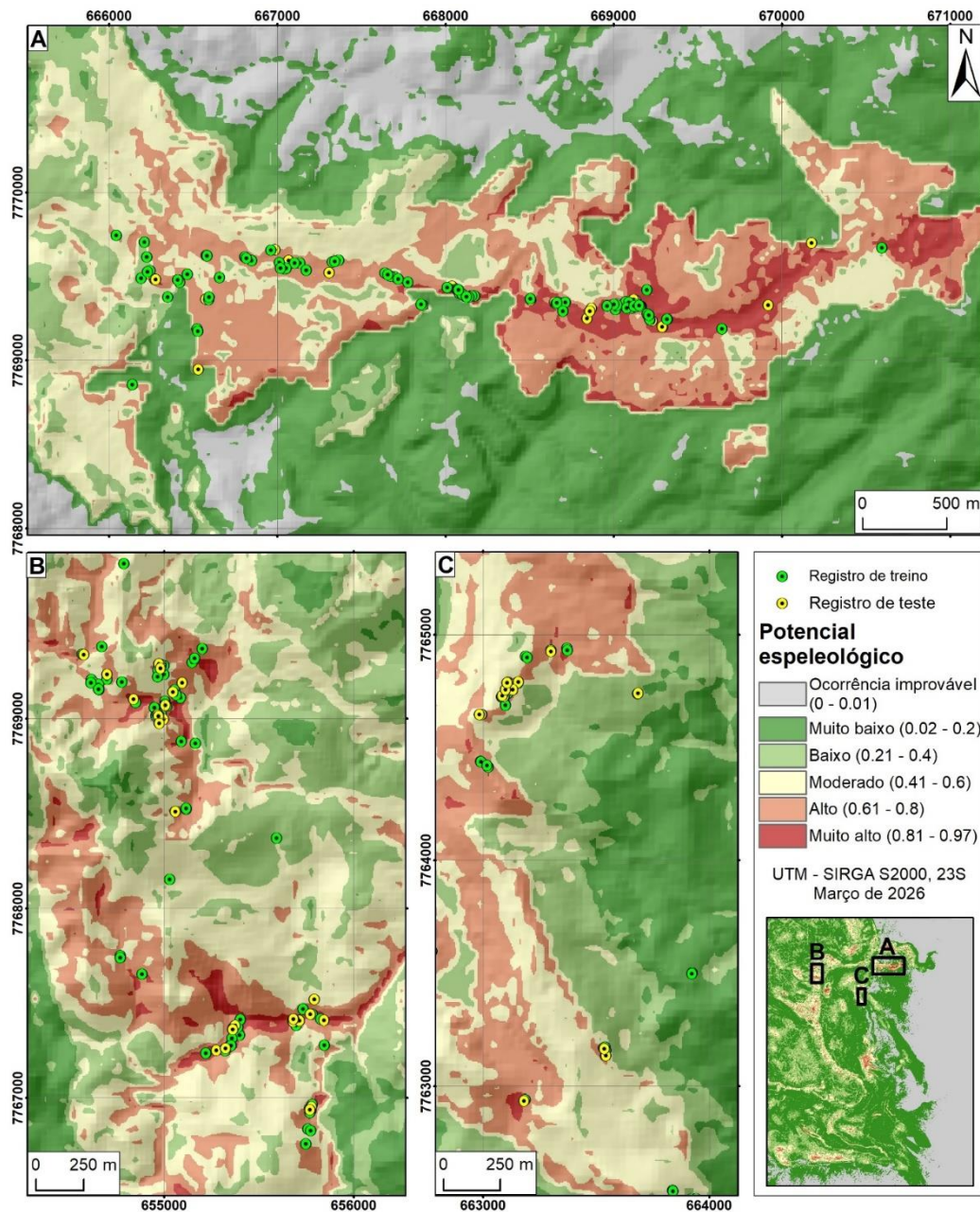


Figura 2: Detalhamento de algumas regiões na área de estudo mostrando a sobreposição das cavidades a zonas de potencial espeleológico.

O Gráfico 3 apresenta a distribuição percentual das classes de potencial espeleológico na AE. As áreas classificadas como de ocorrência improvável correspondem a 37% da AE e estão predominantemente associadas ao domínio de rochas cristalinas do Complexo Santa Bárbara, unidade na qual a gênese de cavidades é, de fato, pouco provável. Por outro lado, as duas classes de maior potencial, quando somadas, representam apenas 2% da área total e ainda assim, concentram cerca de 50% das cavidades registradas no banco de dados utilizado. Esse padrão evidencia a capacidade e a coerência do modelo para espacializar o potencial espeleológico, permitindo maior probabilidade de identificação de novas feições espeleológicas em campo.

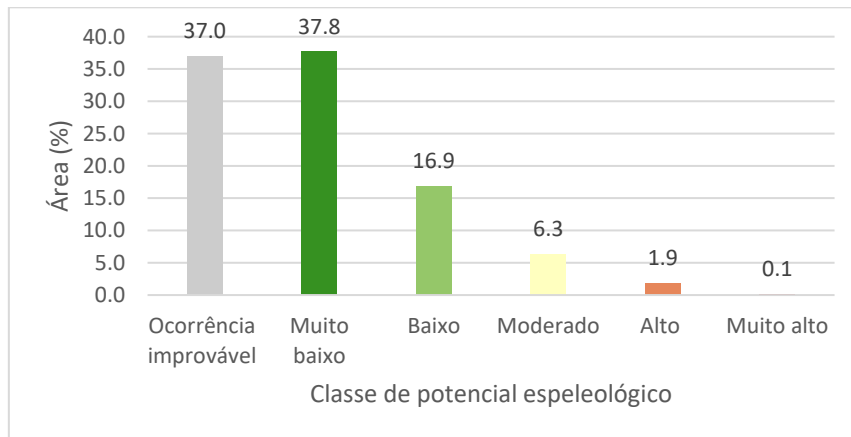


Gráfico 3: Área em cada classe de potencial espeleológico na área de estudo

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem indutiva empregada neste trabalho demonstrou elevada eficiência na predição do potencial espeleológico, evidenciada pela alta acurácia do modelo e pela coerência espacial entre as áreas de maior potencial e a distribuição dos registros de cavidades conforme dados disponibilizados pelo CANIE.

Em comparação aos métodos dedutivos, tradicionalmente utilizados, destaca-se, principalmente, a redução parcial da subjetividade associada à atribuição dos pesos das variáveis e atributos, uma vez que o modelo se baseia em relações empíricas derivadas dos dados de ocorrência. Além disso, a integração de variáveis geomorfométricas, estruturais e de distância permitiu refinar a análise no interior das unidades litológicas, ampliando o nível de detalhamento do mapeamento e evidenciando a heterogeneidade espacial do potencial espeleológico.

Por outro lado, a dependência de registros de cavidades constitui uma limitação relevante da abordagem, restringindo sua aplicabilidade em áreas com baixa disponibilidade de dados ou com forte viés amostral. Adicionalmente, a possível autocorrelação espacial dos registros pode influenciar a performance do modelo, superestimando métricas de validação como a AUC. Nesses casos, métodos dedutivos tradicionais, como a reclassificação geológica e a análise multicritério, permanecem como alternativas viáveis. Dessa forma, recomenda-se que a escolha metodológica considere não apenas a disponibilidade de dados, mas também sua qualidade e distribuição espacial. Estratégias integradas, combinando abordagens indutivas e dedutivas, podem representar um caminho promissor para o aprimoramento dos mapeamentos de potencial espeleológico.

Por fim, destaca-se que os resultados obtidos possuem aplicação direta no planejamento ambiental, contribuindo para a otimização de campanhas de prospecção espeleológica e para a

conservação do patrimônio espeleológico em regiões sob intensa pressão antrópica. Estudos futuros podem incorporar novas variáveis, como parâmetros hidrogeológicos e geoquímicos, bem como explorar técnicas de validação espacial mais robustas, visando ao aprimoramento contínuo dos modelos preditivos.

AGRADECIMENTOS

A Amplo Engenharia e Gestão de Projetos pelo apoio na elaboração deste estudo e pela conceção do Modelo Digital de Terreno.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. S.; MACAMBIRA, J. B.; CABRAL, E. S. Geologia e petrografia de formações ferríferas com ênfase na gênese de cavernas em Serra Norte, Carajás-PA. *Espeleo-Tema*, v. 27, n. 1, p. 33–44, 2016. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/espeleo-tema/espeleo-tema_v27_n1_033-044.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, p. 29–58, 1998. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/server/api/core/bitstreams/e5f6e433-8c1f-4a35-aca2-47f56de5dcb5/content>>. Acesso em abril de 2026.
- AULER, A. S. & PILÓ, L. B. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322477337_Introducao_as_cavernas_em_minerio_de_ferro_e_canga>. Acesso em abril de 2026.
- BARBOSA, G.V.; RODRIGUES, D.M. 1967. Quadrilátero Ferrífero. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 120p.
- BONHAM-CARTER, G. F. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. vol. 13, 398 p., 1ª ed. 1994. Disponível em: <<https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/36>>. Acesso em abril de 2026.
- BRITO, G. R. Efeitos da variação do tamanho amostral e da quantidade de pontos de pseudo ausência e background em modelos de nicho ecológico. 2023. 122 p. Tese (Doutorado em Biociências) – Faculdade de Ciências e Letras, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Assis, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/items/c1bec49e-dfb8-422f-85a4-6ec2e32e18e9>>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- BUISSON, L.; THUILLER, W.; CASAJAUS, N.; LEK, S.; GRENOUILLET, G. Uncertainty in ensemble forecasting of species distribution. *Global Change Biology*, v. 16, n. 4, p. 1145–1157, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02000.x>>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- EL-GABBAS, A.; DORMANN, C. F. Wrong, but useful: regional species distribution models may not be improved by range-wide data under biased sampling. *Ecology and Evolution*, v. 8, n. 4, p. 2196–2206, 2018. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5817152/>>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- FIELDING, A. H.; BELL, J. F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, v. 24, n. 1, p. 38–49, 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- JANSEN, D. C.; CAVALCANTI, L. F.; LAMBLÉM, H. S. Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil, na escala de 1:2.500.000. *Revista Brasileira de Espeleologia*, v. 2, n. 1, p. 42–57, 2012. Disponível em: <https://www.academia.edu/80196182/Mapa_De_Potencialidade_De_Ocorr%C3%Aancia_De_Cavernas_No_Brasil_Na_Escala_De_1_2_500_000>. Acesso em: 22 mar. 2026.

LARANJEIRA, J. O. Avaliação do potencial espeleológico na Serra do Gandarela e apresentação em ambiente 3D, a partir de métodos de geoprocessamento aplicado à segurança e avaliação ambiental de atividades minerárias. 2021. 76 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/items/6c1817f4-44f2-4e37-b681-bc7453883827>>. Acesso em: 22 mar. 2026.

LI, J.; FAN, G.; HE, Y. Predicting the current and future distribution of three *Coptis* herbs in China under climate change conditions, using the MaxEnt model and chemical analysis. *Science of the Total Environment*, v. 698, p. 134141, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134141>. Acesso em: 22 mar. 2026.

MCCARTNEY, K. R.; KUMAR, S.; SING, S. E.; WARD, S. M. Using invaded-range species distribution modeling to estimate the potential distribution of *Linaria* species and their hybrids in the U.S. northern Rockies. *Invasive Plant Science and Management*, v. 12, n. 2, p. 97–111, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/inp.2019.15>>. Acesso em: 22 mar. 2026.

PHILLIPS, S. J. A brief tutorial on Maxent. 2017. Disponível em: <http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/>. Acesso em: 22 mar. 2026.

PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, R. P.; SCHAPIRE, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, v. 190, p. 231–259, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>>. Acesso em: 22 mar. 2026.

SALVADOR JÚNIOR, L. F. Áreas prioritárias para pesquisa e conservação de rapinantes diurnos (aves: Accipitriformes e Falconiformes) ameaçados de extinção na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. 2021. 176 p. Tese (Doutorado em Geografia – Tratamento da informação espacial) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <http://bib.pucminas.br/teses/Geografia_LuizFernandoSalvadorJunior_19115_Textocompleto.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2026.

SWEET, J. A. Measuring the accuracy of a diagnostic system. *Science*, v. 240, p. 1285–1293, 1988. Disponível em: <<https://doi.org/10.1126/science.3287615>>. Acesso em: 22 mar. 2026.

TIMO, J. B.; TIMO, M. B. Geoespeleologia de cavernas em quartzito e formações ferríferas no Quadrilátero Ferrífero, região de Congonhas (MG). *Espeleo-Tema*, v. 27, n. 1, p. 11–32, 2016. Disponível em: <https://www.cavernas.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Espeleo-Tema_v27_n1.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2026.

TÔRRES, N. M. Avaliação de modelos de distribuição de espécies e sua aplicação na conservação da onça-pintada (*Panthera onca*). 2010. 215 p. Tese (Doutorado em Ecologia e Evolução) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/teseserver/api/core/bitstreams/1a3ce849-f972-4a18-9676-104fca597892/content>>. Acesso em: 22 mar. 2026.