

Predição para prospecção do patrimônio arqueológico em áreas de mineração: Geotecnologias para mitigação de riscos e impactos em sítios e otimização do licenciamento ambiental

Rafael Mendes Freitas, Vale S.A, rafael.mendes.freitas@vale.com
Laura Pereira do Nascimento, Concremat, laurape.nascimento@gmail.com
Dan Oliveira, Vale S.A, dan.oliveira@vale.com
Warley de Almeida Delgado, Vale S.A, warley.delgado@vale.com

Resumo: A presença de sítios arqueológicos em áreas de interesse mineral representa um desafio crítico para o planejamento e execução de empreendimentos, podendo gerar atrasos, custos elevados e até paralisações. Para mitigar esses riscos, a adoção de geotecnologias, como geoprocessamento e modelagem preditiva, tem se consolidado como estratégia eficaz na fase prospectiva. A integração de análises geoespaciais, imagens de satélite, modelos digitais de terreno e dados arqueológicos e ambientais permite identificar áreas com potencial arqueológico antes da mobilização de equipes. Os resultados obtidos em campo retroalimentam e aprimoram os modelos iniciais. Baseada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a modelagem considera variáveis como geologia, pedologia, topografia, hidrografia, espeleologia e histórico de ocupação humana, gerando mapas de vulnerabilidade que subsidiam decisões estratégicas. Essa abordagem preventiva otimiza custos, aumenta a segurança, agiliza o licenciamento e contribui para a preservação do patrimônio cultural, assegurando maior sustentabilidade ao setor mineral.

Palavras-chave: Arqueologia Preventiva; Modelagem Preditiva; Geoprocessamento; Sensoriamento Remoto; Gestão do Patrimônio Cultural.

*Prediction for archaeological heritage prospection in mining areas:
Geotechnologies for risk mitigation and impact reduction on sites and for optimizing environmental licensing*

Abstract: The presence of archaeological sites in mining areas represents a critical challenge for planning and executing projects, potentially causing delays, increased costs, and even operational shutdowns. To mitigate these risks, the adoption of geotechnologies such as geoprocessing and predictive modeling has proven to be an effective strategy during the prospecting phase. Integrating geospatial analyses, satellite imagery, digital terrain models, and archaeological and environmental data enables the preliminary identification of areas with archaeological potential before field teams are mobilized. Field results then feed back into and refine the initial models. Based on Geographic Information Systems (GIS), predictive modeling considers variables such as geology, pedology, topography, hydrography, speleology, and historical land use, generating vulnerability maps that support strategic decision-making. This preventive approach optimizes costs, enhances safety, accelerates licensing processes, and contributes to cultural heritage preservation, ensuring greater sustainability in the mining sector.

Keywords: Archaeological; Predictive Modeling; Geoprocessing; Remote Sensing; Cultural Heritage Management; Mining Risk Mitigation.

1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A presença de sítios arqueológicos em áreas de mineração representa um desafio significativo para o planejamento e a execução de empreendimentos minerários, podendo acarretar atrasos, aumento de custos e até a paralisação de atividades. Diante desse cenário, a adoção de metodologias preventivas torna-se essencial para garantir a conformidade com a legislação de proteção ao patrimônio cultural e para mitigar riscos operacionais. Nesse contexto, o uso de geotecnologias e a modelagem preditiva têm se consolidado como uma abordagem eficaz e inovadora (MATYUKIRA; MHANGARA, 2023). A partir da integração de dados geoespaciais é possível identificar áreas com alto potencial arqueológico antes mesmo da mobilização de equipes em campo, priorizando áreas para investigação detalhada e promovendo uma gestão eficiente e sustentável do território (BACHAGHA et al., 2020).

2 - METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado localizado na região de Carajás, município de Parauapebas no sudeste do estado do Pará (Figura 1). O território de abrangência do estudo abrange 4007,14 hectares, apresentando diferentes características ambientais que influenciam o potencial arqueológico da região. A região abriga depósitos minerais de alto valor econômico, consolidando sua importância estratégica para a mineração e para o desenvolvimento regional.

Figura 1. Mapa de localização do território de abrangência do estudo

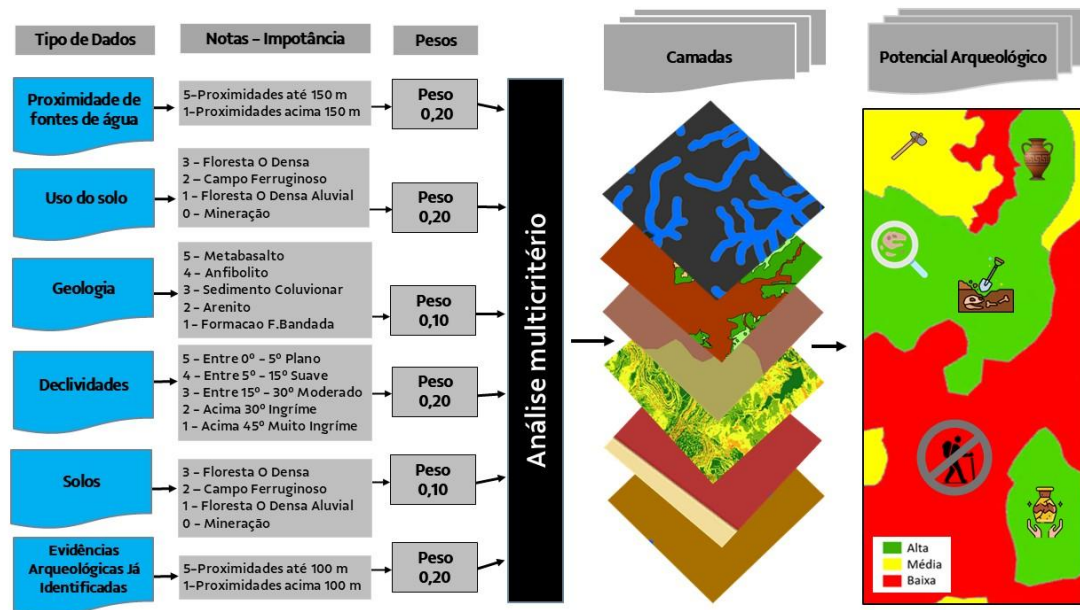


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O estudo utilizou como fontes de dados imagens de satélite multiespectrais, Modelos Digitais de Terreno (MDT), bases cartográficas georreferenciadas, dados geológicos, pedológicos e informações sobre cavidades naturais mapeadas pela Companhia Vale do Rio Doce (Vale), processados principalmente no software ArcGIS Pro (LI et al., 2023). As etapas metodológicas incluíram a seleção de variáveis ambientais relevantes (Figura 2) para a ocorrência de sítios arqueológicos, atribuição de pesos conforme sua influência, normalização e reclassificação das camadas em ambiente SIG, seguida da geração de mapas preditivos por meio de análise multicritério (TEWODROS et al., 2021; MARIAN; IACOB, 2022). O tratamento dos dados envolveu a conversão de vetores em dados matriciais, ponderação das variáveis e soma dos resultados para classificação do potencial arqueológico realizando a análise multicritério por meio do método Weighted Overlay no ArcGIS Pro, elaborando-se um modelo espacial que integrou variáveis ambientais e geográficas com base em sua relevância para a ocorrência de sítios arqueológicos.

A validação foi realizada por meio de prospecção em campo nas áreas de alta e média ocorrência, confirmando a eficácia do modelo aplicado:

Figura 2. Fluxograma representando o percurso metodológico



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3 – RESULTADOS

Os resultados obtidos evidenciam a efetividade da modelagem preditiva arqueológica baseada em análise multicritério e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na definição de áreas prioritárias para investigação, corroborando estudos anteriores (PEREZ, COUTINHO AFONSO E MOTA, 2018). A aplicação da metodologia permitiu reduzir significativamente a extensão das áreas de prospecção, sem comprometer a qualidade na identificação de vestígios, demonstrando seu papel como ferramenta estratégica para gestão patrimonial preventiva.

A integração das variáveis geológicas, pedológicas, topográficas, hidrológicas e histórico de ocupação (Tabela 1) resultou na classificação espacial do potencial arqueológico em três faixas distintas: alta ocorrência (1%), média ocorrência (40%) e baixa ocorrência (59%). Esse padrão indica que, embora a maior parte da área apresente baixo potencial, existem porções críticas que requerem monitoramento contínuo e validação em campo.

Tabela 1 – Resultados do Potencial de Ocorrência Arqueológica, 2025.

Potencial de Ocorrência Arqueológica	Área (ha)	Percentual (%)
3,30 - 5,00 - Alto Potencial Ocorrência	46,75	1%
1,64 - 3,30 - Médio Potencial Ocorrência	1.603,48	40%

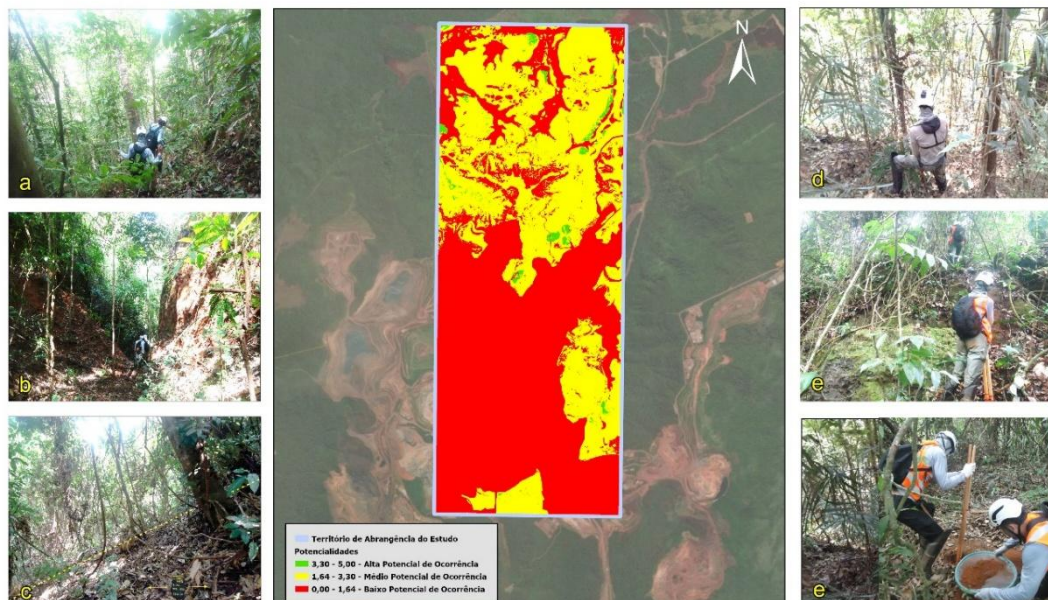
0,00 - 1,64 - Baixo Potencial Ocorrência	2.356,90	59%
Total	4007,14	100%

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A redução de 59% na área de prospecção (Figura 3) confirma a eficiência da abordagem, promovendo otimização de recursos, mitigação de riscos operacionais e alinhamento às diretrizes de sustentabilidade e responsabilidade socioambiental.

A otimização obtida racionalizou recursos e tempo, trazendo benefícios à segurança das equipes e à preservação do patrimônio cultural. A detecção precoce de áreas sensíveis possibilitou ajustes de rotas e aplicação de medidas de mitigação antes do início das operações (TEWODROS et al., 2021). Essa abordagem quantitativa e espacializada, entretanto, deve ser analisada criticamente, pois sua eficácia depende da qualidade dos dados e da validação em campo (Almeida, 2020). Portanto, a modelagem preditiva demonstrou contribuição significativa para redução de custos operacionais, otimização do tempo de prospecção e aumento da segurança. Essa prática fortalece a eficiência do licenciamento ambiental e promove equilíbrio entre exploração econômica e preservação cultural.

Figura 3. Mapa de Potencial de Ocorrência Arqueológica, 2025



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem preditiva arqueológica em áreas de mineração mostrou-se uma ferramenta estratégica para a gestão territorial e a preservação do patrimônio cultural. A

integração de variáveis ambientais em SIG, associada à análise multicritério, possibilitou a geração de mapas de potencial arqueológico orientativos. Esses resultados orientam decisões mais precisas no planejamento das atividades minerárias. Observou-se redução de custos, otimização do tempo de prospecção e aumento da segurança das equipes. Além disso, a abordagem contribui para a agilidade do licenciamento ambiental e o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e conservação patrimonial.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. P. A modelagem preditiva na arqueologia: um olhar crítico a partir do estudo de caso no território Xetá. *Cadernos do LEPAARQ (UFPEL)*, Pelotas, v. 17, n. 33, p. 25–42, maio 2020. DOI: <https://doi.org/10.15210/lepaarq.v17i33.18011>.

BACHAGHA, N. et al. Remote sensing and GIS techniques for reconstructing the military fort system on the Roman boundary (Tunisian section) and identifying archaeological sites. *Remote Sensing of Environment*, v. 248, p. 111956, 2020.

LI, X. et al. Integrating geospatial big data for archaeological site prediction and cultural heritage management. *Remote Sensing*, v. 15, n. 3, p. 817, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15030817>.

MARIAN, C. V.; IACOB, M. The Arch'Terr Project—A GIS-Based Integrated System for Cultural and Archaeological Heritage Protection (Pilot Phase Tested in Romania). *Applied Sciences*, v. 12, n. 21, p. 10852, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122110852>.

MATYUKIRA, C.; MHANGARA, P. Advancement in the application of geospatial technology in archaeology and cultural heritage in South Africa: a scientometric review. *Remote Sensing*, v. 15, p. 4781, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15194781>.

PEREZ, G.; COUTINHO AFONSO, M.; MOTA, L. T. Métodos de análise espacial para sítios arqueológicos: um modelo preditivo para o Estado de São Paulo. *Cadernos do LEPAARQ (UFPEL)*, Pelotas, v. 15, n. 30, p. 98–120, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15210/lepaarq.v15i30.13746>.

TEWODROS, Z. et al. Site suitability analysis for archaeological settlement using GIS-based MCDA: the case of Gedeo Zone, Southern Ethiopia. *Journal of Archaeological Science: Reports*, v. 37, p. 102919, 2021.

WHEATLEY, D. C. Cumulative viewshed analysis: a GIS-based method for investigating intervisibility, and its archaeological application. In: LOCK, G.; STANCIC, Z. (Org.). *Archaeology and geographic information systems*. London: Taylor & Francis, 2022. p. 171–188.

Agradecimentos

Agradecemos à Gerência de Estudos Técnicos da Vale, na pessoa dos Srs. Iuri Brandi, Leandro Arruda e Warley Delgado, pelo apoio institucional, incentivo técnico e contribuição estratégica para o desenvolvimento e aplicação da modelagem preditiva arqueológica no contexto minerário. Este esforço reflete não apenas o compromisso com o avanço das tecnologias geoespaciais, mas também uma contribuição significativa para o desenvolvimento de ferramentas e metodologias que beneficiam a comunidade global. A todos os envolvidos, nosso sincero agradecimento pelo apoio e pela inspiração contínua.