

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

ESTUDO DE UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROPÍCIAS PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE EM MINAS GERAIS

Lara C. Pereira de Faria¹ (IC), Samara Calçado de Azevedo (PQ)²

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Minas Gerais. Sustentabilidade. Análise espacial. Desenvolvimento territorial.

Introdução

O Brasil se destaca como potencial grande exportador de hidrogênio de baixo carbono, devido às condições climáticas favoráveis para a geração de energia por fontes eólicas, solar e hídricas (OLIVEIRA, 2022). Minas Gerais, o segundo estado mais populoso do Brasil de acordo com o IBGE, apresenta elevada demanda populacional e abundância de recursos naturais, como água e biodiversidade, favorecendo estudos voltados à produção de energia limpa, como o hidrogênio verde (H₂V). Contudo, identificar áreas adequadas à produção desse recurso exige análise espacial detalhada, especialmente devido à extensão territorial do estado e à complexidade dos dados geográficos envolvidos.

Com base nas informações levantadas, foram definidos quatro grandes critérios para avaliar o potencial de produção de hidrogênio verde: desenvolvimento, meio ambiente, infraestrutura e recursos disponíveis. Esses critérios foram detalhados em vinte e quatro subcritérios, de forma a contemplar de maneira mais abrangente os fatores que influenciam a viabilidade dessa produção. Entre os subcritérios, podemos destacar a disponibilidade de áreas sem restrições legais e ambientais, índice de desenvolvimento humano, a existência de rodovias e dutovias, e a disponibilidade de recursos como biomassa e solar. Para cada um dos critérios e subcritérios levantados, fez-se a construção de mapas temáticos. A elaboração cartográfica, iniciada na concepção do projeto gráfico do mapa, é essencial para garantir a comunicação eficiente de informações geográficas. Esta etapa compreende o planejamento visual e funcional de todos os elementos cartográficos, de modo a permitir que decisores compreendam o espaço representado e atuem com base em evidências. A integração de dados de múltiplas fontes públicas, no entanto, apresenta desafios quanto à consistência, atualização e precisão das informações. Este estudo propõe a elaboração de mapas temáticos para o estado de Minas Gerais, o uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o método AHP (Analytic Hierarchy Process). o objetivo é integrar

aspectos de desenvolvimento territorial, infraestrutura disponível e disponibilidade de recursos, de modo a subsidiar o planejamento e a implantação de projetos de hidrogênio verde (H₂V), através da análise hierárquica dos 24 subcritérios. A iniciativa busca contribuir para uma definição territorial mais eficiente e ambientalmente responsável para a produção de energia limpa.

Metodologia

1. Concepção do projeto cartográfico

Nesta etapa, os principais elementos envolvidos na representação espacial foram definidos, como a escala, a composição visual do layout e mapa base, o Datum e projeção cartográfica, disposição da legenda e norte geográfico, ordenamento das camadas de fundo, identificação de autores e logos de universidades participantes, definição da posição e fonte dos textos toponímicos - aqueles que dão nome às feições geográficas, entre outros. Essa etapa é fundamental para uma comunicação cartográfica eficiente e clara para as produções temáticas e cada subcritério.

2. Aquisição e manipulação dos dados geoespaciais

A construção da base de dados geoespacial fundamentou-se na integração de fontes públicas confiáveis. A malha municipal e a divisão microrregional oficial foram obtidas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), constituindo o recorte espacial de referência adotado neste estudo. Informações referentes aos critérios adotados foram incorporadas a partir de bases disponibilizadas pelas seguintes fontes:

- IDE-Sisema – informações ambientais e áreas de restrição a nível municipal;
- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (Incra) – dados sobre territórios quilombolas a nível municipal;
- Fundação Nacional dos Povos Indígenas (Funai) – delimitação de terras indígenas a nível municipal;

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) – rede de linhas de transporte a nível estadual;
- Instituto Aço Brasil – unidades industriais relacionadas à siderurgia;
- Ministério da Educação (MEC) – instituições de ensino técnico e superior a nível municipal;
- NASA Giovanni (Goddard Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure) – média da temperatura a nível nacional;
- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRECESB) – dados de irradiação solar a nível municipal.

A maioria dos dados estão dispostos a nível de município e por estratégia do projeto, optou-se por trabalhar em microrregiões do estado. Dessa forma, foi preciso fazer a agregação dos dados utilizando a ferramenta “Unir Atributos por Localização” do QGIS. Adicionalmente, dados baseados nas microrregiões do estado foram sistematizados em planilhas auxiliares elaboradas no software Excel e posteriormente integrados ao ambiente geoespacial por meio da ferramenta disponível.

A organização do banco de dados foi realizada no QGIS 3.34.10, assegurando a interoperabilidade entre diferentes formatos vetoriais e matriciais.

Para representação dos indicadores, empregou-se a simbologia graduada, utilizando o método de “quebra natural de Jenks” com cinco classes. Essa escolha buscou destacar padrões de distribuição regional.

Procedimentos de verificação e correção foram aplicados com o intuito de eliminar inconsistências espaciais, como sobreposições e erros de delimitação, de modo a garantir a consistência e a acurácia cartográfica da base utilizada para a elaboração dos mapas temáticos.

3. Elaboração do mapeamento temático

A etapa de mapeamento temático estruturou-se em quatro dimensões principais, contemplando aspectos socioeconômicos, de infraestrutura, de recursos naturais e ambientais:

- Mapas de desenvolvimento: representaram indicadores sociais e educacionais relevantes para a compreensão da dinâmica regional, incluindo o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) e a distribuição de instituições de ensino técnico e superior.
- Mapas de infraestrutura: englobaram a densidade de linhas de transporte (rodoviário, ferroviário, hidroviário e dutoviário), bem como a quantidade

de refinarias e siderurgias agregadas por microrregião, evidenciando a capacidade instalada e a logística de suporte à produção de energia.

- Mapas de recursos: contemplaram variáveis estratégicas para a geração de hidrogênio verde (H₂V), como o potencial solar, a irradiação solar média anual e indicadores de potencial econômico associado à produção de H₂V.
- Mapas de aspectos ambientais: abrangeram as áreas de restrição legal e ambiental (unidades de conservação, terras indígenas e territórios quilombolas) e o uso e ocupação do solo, de forma a delimitar regiões inviáveis ou limitadas para instalação de empreendimentos.

Todos os mapas foram produzidos no ambiente QGIS e normalizados, a partir da fórmula:

$$norm = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Onde, “X” representa o valor de interesse, “X_{min}” o valor mínimo e “X_{max}” o valor máximo da variável.

A normalização foi utilizada para deixar os valores na mesma escala, dentro de um intervalo entre 0 e 1. Com isso, os diferentes dados puderam ser comparados de forma mais equilibrada. Além disso, para a aplicação do método AHP, os mapas finais precisaram ser transformados para o formato raster, garantindo a compatibilidade dos dados organizados em matriz com a resolução espacial adotada. Esse procedimento possibilitou a integração dos diferentes critérios e a identificação mais precisa das regiões mais propícias.

Resultados e discussão

A análise dos mapas elaborados permitiu identificar a distribuição espacial dos critérios levantados. Em função da disponibilidade limitada de espaço, optou-se por apresentar alguns exemplos dos mapas relacionados a disponibilidade de recursos, da infraestrutura e do desenvolvimento no estado de Minas Gerais. Observou-se que as microrregiões situadas no noroeste do estado apresentam cerca de 32% de área com recurso solar disponível (figura 1), configurando-se como áreas estratégicas para o aproveitamento da produção de energia limpa (figura 2). No entanto, a região centro-sul destacou-se pelo melhor desempenho em termos de infraestrutura de transportes (figura 3), o que potencializa a integração logística e da produção.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Apesar do elevado nível de desenvolvimento nas áreas próximas à capital, constatou-se que essa região concentra um número elevado de riscos hidrogeológicos (figura 4), com mais de três tipos de risco (Enxurrada, Inundação e Deslizamento) em atividade nas regiões centrais e do Sudeste. Tal condição evidencia a necessidade de políticas públicas voltadas à mitigação desses riscos, de modo a equilibrar o crescimento urbano e econômico com a segurança socioambiental.

Figura 1 – Distribuição da Irradiação solar média mensal no estado.

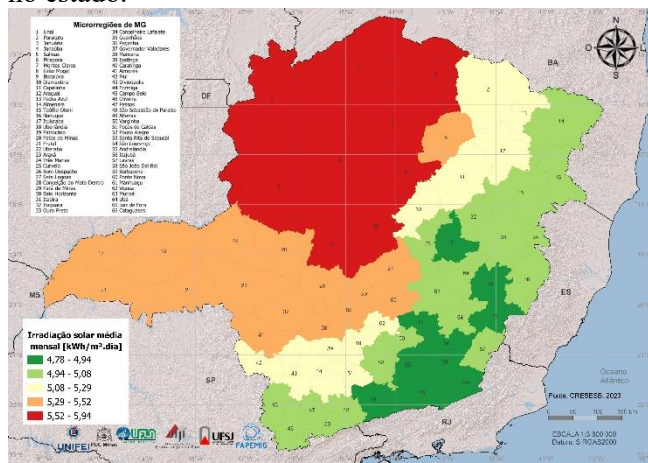


Figura 2 – Potencial de produção de hidrogênio verde a partir da irradiação solar.

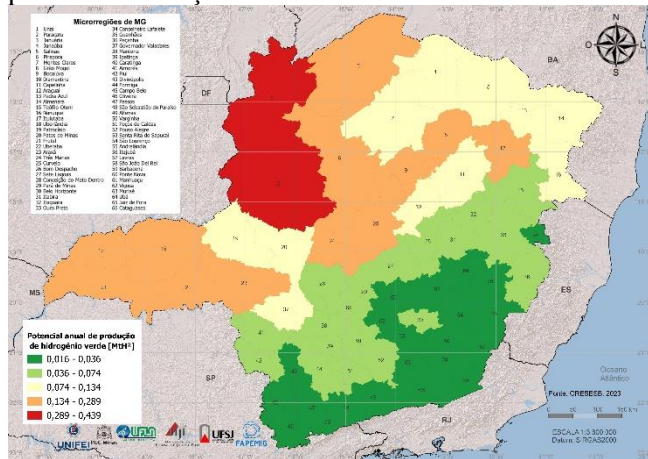


Figura 3 – Densidade de linhas de transporte rodoviários

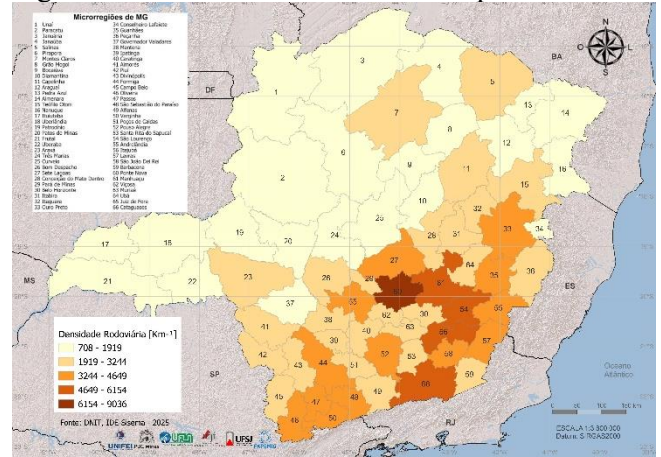
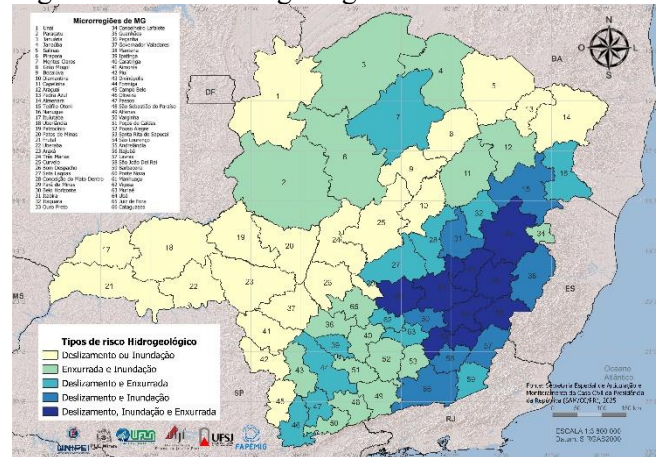


Figura 4 – Risco hidrogeológico existentes no estado.



Na etapa de análise multicritério, um questionário foi empregado. A partir das respostas dos especialistas, está em desenvolvimento o cálculo dos pesos relativos aos critérios considerados. Esse procedimento buscou refletir a importância atribuída por especialistas a cada parâmetro, servindo de base para a hierarquização das áreas com potencial para a produção de hidrogênio verde. Em paralelo, foi iniciada a integração de todos os dados no ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) por meio da modelagem AHP (Analytic Hierarchy Process). Essa etapa ainda se encontra em fase de finalização, sendo responsável por englobar os diferentes critérios em um modelo espacial, capaz de representar os aspectos socioeconômicos, ambientais e de infraestrutura analisados.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**Conclusões**

A análise espacial realizada no estado de Minas Gerais evidencia a diversidade regional quanto à disponibilidade de recursos naturais, infraestrutura e riscos ambientais.

Ressalta-se que o estudo foi viabilizado pela disponibilidade de dados públicos, o que possibilitou a elaboração de uma macro análise das regiões. Nesse contexto, destaca-se a importância de disponibilizar tais informações aos tomadores de decisão, uma vez que o acesso a essas informações é essencial para a formulação de políticas capazes de igualar os aspectos de recurso e desenvolvimento regional.

Por fim, a análise aponta para a relevância de identificar potenciais locais que viabilizem a produção de hidrogênio verde, utilizando o método AHP e promovendo o desenvolvimento equilibrado em todo o território.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e pelo fomento à pesquisa, que permitiram a realização deste estudo. Os autores agradecem a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e à FAPEMIG pelo financiamento do projeto RED-00090-21.

Referências

BRASIL. Ministério da Educação (MEC). *Cadastro Nacional de Instituições de Ensino Superior*. Brasília: MEC, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/mec/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRECESB). *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. Rio de Janeiro: CRECESB, [s.d.]. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Base cartográfica da infraestrutura de transportes*. Brasília: DNIT, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS (FUNAI). *Terras Indígenas do Brasil*. Brasília: FUNAI, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/funai/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Malhas Territoriais*. Rio de Janeiro: IBGE,

2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais>. Acesso em: 7 maio 2025.

IDE-SISEMA – INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Belo Horizonte: SISEMA, 2024. Disponível em: <https://www.sisema.mg.gov.br/ide-sisema>. Acesso em: 7 maio 2025.

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Dados setoriais: siderurgia brasileira*. Brasília: Instituto Aço Brasil, [s.d.]. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). *Acervo Fundiário: Territórios Quilombolas*. Brasília: INCRA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/incra/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

MAPBIOMAS. *Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra no Brasil*. [S.l.]: MapBiomass, [s.d.]. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 9 maio 2025.

MARTINELLI, M. *Mapas da Geografia e cartografia temática*. 6. ed. São Paulo: Contexto, 2014. 144 p.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *Giovanni: The Bridge Between Data and Science*. Greenbelt, MD: NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), [s.d.]. Disponível em: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

OLIVEIRA, R. C. *Panorama do Hidrogênio no Brasil*. Texto para Discussão (IPEA), v. 2787, p. 6-53, 2022.