v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

MAPEAMENTO ENERGOAMBIENTAL DO MEIO ANTRÓPICO PARA USINAS FOTOVOLTAICAS NA REGIÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE/SP

ENERGY-ENVIRONMENTAL MAPPING OF THE ANTHROPIC ENVIRONMENT FOR PHOTOVOLTAIC PLANTS IN THE PRESIDENTE PRUDENTE REGION, SÃO PAULO, BRAZIL

MAPEO ENERGÉTICO-AMBIENTAL DEL MEDIO ANTRÓPICO PARA PLANTAS FOTOVOLTAICAS EN LA REGIÓN DE PRESIDENTE PRUDENTE, SÃO PAULO, BRASIL

Rodolfo Yuri de Almeida Fontana[1], Miguel Edgar Morales Udaeta[2], Rodrigo de Souza[3], Vanessa Meloni Massara[4]

e7119506
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9506

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

A expansão da geração fotovoltaica centralizada exige metodologias capazes de identificar áreas tecnicamente viáveis, ambientalmente sustentáveis e socialmente compatíveis para empreendimentos de grande porte. Este trabalho propõe a Metodologia de Mapeamento Energoambiental para Usinas Fotovoltaicas Centralizadas (MMEA-FV), voltada a usinas entre 50 MW e 300 MW, com ênfase nos condicionantes do meio antrópico. A metodologia fundamenta-se em revisão bibliográfica, análise documental e integração multicritério de variáveis como irradiação solar, declividade do terreno, proximidade da infraestrutura elétrica, uso e ocupação do solo, distância de áreas urbanizadas, comunidades tradicionais e áreas protegidas, ponderadas pelo método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), que atribuiu pesos de 0,40 ao grupo energético, 0,20 ao ambiental e 0,40 ao do meio antrópico, e sintetizadas no Índice de Aptidão Energoambiental Fotovoltaica (IAEF). A MMEA-FV foi aplicada, em caráter demonstrativo, à Região Administrativa de Presidente Prudente (SP). As estimativas ilustrativas obtidas indicam três áreas prioritárias com potencial da ordem de 405 MW e geração anual próxima de 850 GWh; esses valores exemplificam o procedimento de cálculo e não decorrem de processamento geoespacial completo nem de validação estatística. Os resultados indicam que a integração sistemática de variáveis técnicas, ambientais e do meio antrópico torna a seleção de áreas mais abrangente e permite antecipar conflitos territoriais, configurando potencial instrumento de apoio ao planejamento energético, condicionado à aplicação operacional e à validação descritas no trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Energia fotovoltaica. Mapeamento energoambiental. Geração centralizada. Meio antrópico. Planejamento energético.

ABSTRACT

The expansion of centralized photovoltaic generation requires methodologies able to identify areas that are technically feasible, environmentally sustainable and socially compatible for large-scale projects.

[1] Universidade de São Paulo (USP), Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), São Paulo. Engenheiro Eletricista e Engenheiro Civil pela Universidade Anhembi Morumbi, Mestrando em Engenharia Elétrica (Sistemas de Potência) pela USP, com atuação em engenharia de manutenção, infraestrutura e eficiência energética.
[2] Universidade de São Paulo, Escola Politécnica (GEPEA/EPUSP). Doutor em Engenharia Elétrica e Livre-Docente pela EPUSP, professor e pesquisador na área de planejamento energético e planejamento integrado de recursos.
[3] Faculdade de Tecnologia de Franco da Rocha (Fatec Franco da Rocha/CPS). Professor do curso de Gestão de Energia e Eficiência Energética, Mestre em Ciências (IAG/USP) e em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos (CEETEPS)
[4] Universidade de São Paulo, Centro de Inovação e Soluções para Transição Energética em Municípios (CISTEM/EPUSP-FAPESP). Engenheira Civil, Doutora em Energia e Pós-Doutora em Engenharia de Produção, pesquisadora em eficiência energética na construção civil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

This study proposes the Energy-Environmental Mapping Methodology for Centralized Photovoltaic Plants (MMEA-FV), aimed at plants between 50 MW and 300 MW, with emphasis on anthropic-environment factors. The methodology is based on literature review, document analysis and the multi-criteria integration of variables such as solar irradiation, terrain slope, proximity to power infrastructure, land use and occupation, distance from urban areas, traditional communities and protected areas, weighted through the Analytic Hierarchy Process (AHP), which assigned weights of 0.40 to the energy group, 0.20 to the environmental group and 0.40 to the anthropic group, and synthesized in the Photovoltaic Energy-Environmental Suitability Index (IAEF). The MMEA-FV was applied, on a demonstrative basis, to the Presidente Prudente Administrative Region (São Paulo State, Brazil). The illustrative estimates obtained point to three priority areas with a potential of about 405 MW and annual generation close to 850 GWh; these values exemplify the calculation procedure and do not result from full geospatial processing or statistical validation. The results indicate that systematically integrating technical, environmental and anthropic variables makes site selection more comprehensive and helps anticipate territorial conflicts, providing a potential decision-support tool for energy planning, subject to the operational application and validation described in the paper.

KEYWORDS: *Photovoltaic energy. Energy-environmental mapping. Centralized generation. Anthropic environment. Energy planning.*

RESUMEN
La expansión de la generación fotovoltaica centralizada exige metodologías capaces de identificar áreas técnicamente viables, ambientalmente sostenibles y socialmente compatibles para emprendimientos de gran escala. Este trabajo propone la Metodología de Mapeo Energético-Ambiental para Plantas Fotovoltaicas Centralizadas (MMEA-FV), orientada a plantas entre 50 MW y 300 MW, con énfasis en los condicionantes del medio antrópico. La metodología se basa en revisión bibliográfica, análisis documental e integración multicriterio de variables como irradiación solar, pendiente del terreno, proximidad a la infraestructura eléctrica, uso y ocupación del suelo, distancia a áreas urbanizadas, comunidades tradicionales y áreas protegidas, ponderadas mediante el Analytic Hierarchy Process (AHP), que asignó pesos de 0,40 al grupo energético, 0,20 al ambiental y 0,40 al del medio antrópico, y sintetizadas en el Índice de Aptitud Energético-Ambiental Fotovoltaica (IAEF). La MMEA-FV se aplicó, con carácter demostrativo, a la Región Administrativa de Presidente Prudente (São Paulo, Brasil). Las estimaciones ilustrativas obtenidas indican tres áreas prioritarias con un potencial del orden de 405 MW y una generación anual cercana a 850 GWh; estos valores ejemplifican el procedimiento de cálculo y no derivan de un procesamiento geoespacial completo ni de una validación estadística. Los resultados indican que la integración sistemática de variables técnicas, ambientales y del medio antrópico amplía la selección de áreas y permite anticipar conflictos territoriales, configurando un potencial instrumento de apoyo a la planificación energética, condicionado a la aplicación operativa y a la validación descritas en el trabajo.

PALABRAS CLAVE: *Energía fotovoltaica. Mapeo energético-ambiental. Generación centralizada. Medio antrópico. Planificación energética.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por energia elétrica, associada às preocupações com as mudanças climáticas e à necessidade de diversificação da matriz energética, tem impulsionado

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

a expansão das fontes renováveis em diversos países. Nesse cenário, a energia solar fotovoltaica destaca-se como uma das tecnologias de maior crescimento nas últimas décadas, impulsionada pela redução dos custos de implantação, pelo avanço tecnológico dos módulos e pelas políticas de descarbonização do setor elétrico. No Brasil, os elevados níveis de irradiação solar distribuídos ao longo do território posicionam o país como um dos mercados mais promissores para a geração fotovoltaica em larga escala.

A geração fotovoltaica centralizada, conectada diretamente ao Sistema Interligado Nacional (SIN), desempenha papel estratégico na ampliação da oferta de energia e na segurança energética do país (EPE, 2024). Empreendimentos com potência instalada entre 50 MW e 300 MW apresentam elevada capacidade de geração, mas demandam extensas áreas territoriais, investimentos expressivos e um processo de planejamento criterioso, uma vez que sua localização influencia diretamente aspectos ambientais, sociais, econômicos e operacionais.

Embora o potencial de irradiação solar seja frequentemente considerado o principal critério de seleção de áreas, a literatura demonstra que a viabilidade desses empreendimentos depende da integração de múltiplos fatores: topografia, uso e ocupação do solo, proximidade da infraestrutura elétrica, restrições ambientais e condicionantes do meio antrópico. Decisões fundamentadas exclusivamente em parâmetros energéticos podem resultar em conflitos territoriais, aumento de custos e impactos socioambientais significativos.

Nesse contexto, o mapeamento energoambiental surge como ferramenta de apoio ao planejamento territorial, integrando critérios técnicos, ambientais e socioeconômicos para identificar áreas com maior potencial de exploração solar e menor impacto ambiental. O emprego de técnicas de geoprocessamento e de análise multicritério tem ampliado a capacidade de avaliação espacial desses empreendimentos, permitindo maior precisão na identificação de áreas prioritárias para investimentos.

Entre os fatores considerados no planejamento territorial, o meio antrópico assume importância crescente devido à intensificação dos conflitos pelo uso do solo. A expansão fotovoltaica em larga escala pode interferir em áreas agrícolas, alterar a dinâmica econômica local e impactar comunidades tradicionais, áreas urbanizadas e patrimônios culturais. Contudo, muitos estudos de mapeamento energoambiental ainda concentram sua análise em critérios solares e ambientais, atribuindo menor atenção às variáveis antrópicas — lacuna que compromete a efetividade do planejamento territorial.

Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de um estudo de mapeamento energoambiental aplicado à implantação de usinas fotovoltaicas centralizadas de grande porte (50 MW a 300 MW), com foco na incorporação de variáveis do meio antrópico,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

integrando critérios energéticos, ambientais e territoriais para subsidiar um planejamento tecnicamente eficiente, ambientalmente responsável e socialmente equilibrado, contribuindo para reduzir conflitos socioambientais, otimizar investimentos em infraestrutura elétrica e apoiar a tomada de decisão de órgãos governamentais, agentes reguladores, empresas do setor elétrico e investidores.

1.1. Problema de pesquisa

Tradicionalmente, a escolha do local tem sido baseada predominantemente em critérios energéticos — disponibilidade de recurso solar, relevo e proximidade da infraestrutura elétrica. A desconsideração de aspectos do meio antrópico — uso e ocupação do solo, densidade populacional, atividades econômicas, comunidades tradicionais, patrimônio cultural e conflitos fundiários — pode gerar dificuldades no licenciamento ambiental, aumento de custos, conflitos sociais e atrasos na execução dos projetos. Ainda assim, a integração sistemática dessas variáveis permanece limitada em muitos estudos de mapeamento energoambiental, que priorizam critérios técnicos e ambientais (SWARD *et al.*, 2021).

Diante desse contexto, o presente trabalho busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: como desenvolver um estudo de mapeamento energoambiental para usinas fotovoltaicas centralizadas de grande porte, com potência entre 50 MW e 300 MW, que integre critérios energéticos, ambientais e do meio antrópico, de modo a identificar áreas com maior aptidão para implantação e subsidiar o planejamento territorial sustentável?

Do ponto de vista social, decisões de localização mal fundamentadas podem gerar deslocamento de atividades produtivas, perda de renda para populações rurais e conflitos fundiários de difícil reversão. Assim, mais do que um instrumento técnico de seleção de áreas, a metodologia proposta busca subsidiar decisões que minimizem esses impactos sobre as comunidades afetadas.

1.2. Objetivo geral

Desenvolver um estudo de mapeamento energoambiental aplicado à implantação de usinas fotovoltaicas centralizadas de grande porte, com potência entre 50 MW e 300 MW, integrando critérios energéticos, ambientais e do meio antrópico, de modo a identificar áreas com maior aptidão territorial e subsidiar o planejamento sustentável da expansão fotovoltaica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.3. Objetivos específicos

OE1 – Caracterizar os aspectos técnicos e operacionais das usinas fotovoltaicas centralizadas de grande porte, destacando seus requisitos de implantação e integração ao sistema elétrico.

OE2 – Identificar os principais critérios energéticos, ambientais e do meio antrópico que influenciam a seleção de áreas para implantação desses empreendimentos, com base na literatura técnica e científica.

OE3 – Estruturar uma metodologia de mapeamento energoambiental fundamentada na integração multicritério, voltada à avaliação da aptidão territorial.

OE4 – Aplicar a metodologia proposta em um estudo de caso, classificando as áreas quanto ao seu potencial de implantação.

OE5 – Analisar os resultados obtidos, discutindo a influência dos fatores energéticos, ambientais e antrópicos no planejamento territorial e na expansão sustentável da geração fotovoltaica centralizada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Geração fotovoltaica centralizada de grande porte

A energia solar fotovoltaica consolidou-se como uma das principais alternativas para a expansão sustentável da geração elétrica mundial, impulsionada pelo avanço tecnológico dos módulos e pela redução dos custos de fabricação, instalação e operação. O princípio de funcionamento baseia-se no efeito fotovoltaico: fótons incidentes sobre materiais semicondutores — predominantemente o silício — liberam elétrons, gerando corrente contínua posteriormente convertida em corrente alternada por inversores. A simplicidade operacional, a baixa necessidade de manutenção e a ausência de emissões durante a operação tornam essa tecnologia uma das mais promissoras entre as fontes renováveis.

A geração fotovoltaica centralizada caracteriza-se pela produção de energia em usinas de grande porte conectadas diretamente ao SIN, comercializando sua produção no Ambiente de Contratação Regulada (leilões) ou no Ambiente de Contratação Livre. Diferentemente da geração distribuída, a geração centralizada concentra elevados níveis de potência em áreas com condições favoráveis de implantação, permitindo ganhos de escala e redução dos custos específicos de geração.

Usinas com potência entre 50 MW e 300 MW exigem planejamento integrado desde as fases iniciais: além da disponibilidade do recurso solar, sua viabilidade depende da infraestrutura

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

elétrica capaz de absorver a energia gerada, da proximidade de linhas de transmissão e subestações, da disponibilidade de áreas adequadas e da viabilidade econômica do empreendimento. A escolha inadequada do local pode gerar conflitos de uso do solo, supressão de vegetação, interferência em atividades econômicas existentes e aumento dos custos de conexão. Por isso, o sucesso desses empreendimentos depende da integração entre fatores energéticos, ambientais e territoriais, e não apenas da disponibilidade do recurso solar.

2.2. Mapeamento energoambiental

O mapeamento energoambiental destaca-se como ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo integrar informações energéticas, ambientais, territoriais e socioeconômicas para identificar áreas com maior aptidão para implantação de empreendimentos. Diferentemente das avaliações convencionais — que frequentemente consideram apenas o potencial energético disponível —, essa abordagem incorpora fatores ambientais, territoriais e antrópicos em um mesmo processo de avaliação, tornando o planejamento mais eficiente e reduzindo riscos técnicos, ambientais e econômicos.

No caso da geração fotovoltaica centralizada, o mapeamento energoambiental assume papel estratégico: a escolha inadequada da localização de uma usina pode comprometer sua viabilidade técnica e financeira, mesmo havendo elevada irradiação solar disponível. A evolução das tecnologias de geoprocessamento e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ampliou significativamente as possibilidades de aplicação dessa abordagem, permitindo integrar diferentes bases de dados espaciais e elaborar mapas temáticos representativos de diferentes níveis de aptidão territorial (LONGLEY *et al.*, 2005; SILVA; ZAIDAN, 2004).

A utilização de métodos de análise multicritério permite ponderar a influência relativa de diferentes variáveis energéticas, ambientais e socioeconômicas, resultando em modelos de apoio à decisão capazes de identificar regiões com elevado potencial de geração, minimizar impactos ambientais, reduzir conflitos de uso do solo e otimizar investimentos em infraestrutura elétrica.

2.3. Meio antrópico no planejamento territorial

O planejamento territorial de empreendimentos energéticos tem evoluído nas últimas décadas, deixando de considerar exclusivamente aspectos técnicos e ambientais para incorporar fatores relacionados ao meio antrópico — o conjunto de elementos resultantes da intervenção humana sobre o território, incluindo áreas urbanizadas, atividades agropecuárias, infraestrutura

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de transporte e de transmissão de energia, patrimônio histórico e cultural, comunidades tradicionais e demais formas de ocupação e uso do solo (SANTOS, 2004).

Entre os principais fatores antrópicos que influenciam a seleção de áreas destacam-se o uso e ocupação do solo, a proximidade de áreas urbanizadas, a presença de infraestrutura viária, a disponibilidade de linhas de transmissão e subestações, a existência de atividades agrícolas consolidadas e a localização de comunidades tradicionais, terras indígenas, territórios quilombolas e áreas de interesse histórico e cultural. A proximidade de rodovias e ferrovias facilita o transporte de equipamentos de grande porte, reduzindo custos e prazos de execução, enquanto a disponibilidade de infraestrutura elétrica próxima reduz investimentos de conexão.

Áreas destinadas à agricultura intensiva, expansão urbana ou atividades industriais podem apresentar elevado potencial energético, mas sua utilização para usinas fotovoltaicas pode gerar conflitos econômicos e sociais; em contrapartida, áreas degradadas ou anteriormente antropizadas costumam representar alternativas mais adequadas, reduzindo impactos ambientais e conflitos relacionados ao uso da terra. A proteção de comunidades tradicionais e do patrimônio cultural completa esse conjunto de variáveis, reforçando os princípios do desenvolvimento sustentável.

2.4. Critérios de seleção de áreas e bases de dados

Como a utilização de um único critério, como a disponibilidade do recurso solar, não é suficiente para garantir a implantação eficiente de usinas de grande porte (SWARD *et al.*, 2021), os critérios considerados neste trabalho foram organizados em três grupos. Os critérios energéticos, relacionados ao desempenho operacional da usina, incluem a Irradiação Global Horizontal (GHI), a declividade do terreno, a temperatura ambiente e a proximidade de linhas de transmissão e subestações. Os critérios ambientais, cuja finalidade é minimizar impactos ecológicos e facilitar o licenciamento, consideram Áreas de Preservação Permanente (APPs), Unidades de Conservação, recursos hídricos e cobertura vegetal. Os critérios do meio antrópico — principal diferencial deste estudo — abrangem uso e ocupação do solo, proximidade de áreas urbanizadas, infraestrutura viária, linhas de transmissão, comunidades tradicionais e patrimônio histórico-cultural. O Quadro 1 sintetiza esses critérios, suas justificativas técnicas e as principais fontes de dados utilizadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 1. Critérios, justificativas e fontes de dados utilizados na metodologia

Grupo	Critério	Justificativa / Objetivo	Principal fonte de dados
Energético	Irradiação solar (GHI)	Maximiza o potencial de geração de energia	INPE (2017); Banco Mundial (2024)
Energético	Declividade	Reduz custos de terraplenagem e instalação	IBGE (2024); USGS (2023)
Energético	Temperatura	Influencia o desempenho dos módulos	INMET (2022)
Energético	Distância da linha de transmissão	Reduz custos de conexão elétrica	ONS (2025); ANEEL (2025)
Energético	Distância da subestação	Favorece a integração ao SIN	ANEEL (2025)
Ambiental	Áreas de Preservação Permanente	Evita conflitos com a legislação ambiental	Brasil (2012); ANA (2024)
Ambiental	Unidades de Conservação	Preserva áreas ambientalmente sensíveis	MMA (2025)
Ambiental	Recursos hídricos	Minimiza impactos sobre corpos d'água	ANA (2024)
Ambiental	Cobertura vegetal	Reduz a necessidade de supressão vegetal	MapBiomas (2025)
Antrópico	Uso e ocupação do solo	Minimiza conflitos com atividades existentes	IBGE (2024); MapBiomas (2025)
Antrópico	Áreas urbanizadas	Reduz interferências sobre a população	IBGE (2023)
Antrópico	Rodovias	Facilita a logística de implantação	DNIT (2025)
Antrópico	Linhas de transmissão	Aproveita infraestrutura elétrica existente	ONS (2025); ANEEL (2025)
Antrópico	Comunidades tradicionais	Minimiza impactos sociais e culturais	FUNAI (2025); FCP (2025)
Antrópico	Patrimônio histórico-cultural	Preserva bens materiais e imateriais protegidos	IPHAN (2025)

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As bases indicadas no Quadro 1 são públicas e atualizáveis, o que favorece a reprodutibilidade da metodologia e sua replicação em outras regiões do país.

2.5. Métodos multicritério aplicados ao planejamento territorial

O planejamento territorial para implantação de empreendimentos energéticos caracteriza-se como um problema de decisão complexo, envolvendo múltiplos critérios

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

frequentemente conflitantes. Nesse contexto, os métodos multicritério de apoio à decisão (*Multi-Criteria Decision Analysis* – MCDA) consolidaram-se como ferramentas para integrar diferentes variáveis em um processo sistemático e transparente de tomada de decisão, atribuindo pesos relativos a cada critério de acordo com sua importância.

Entre os métodos mais utilizados destaca-se o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Saaty (1980), que estrutura o problema em níveis hierárquicos e utiliza comparações par a par para determinar a importância relativa entre critérios. Sua principal vantagem é a facilidade de aplicação e a capacidade de incorporar o julgamento de especialistas; sua limitação está na subjetividade da atribuição dos pesos, o que exige procedimentos de validação da consistência das comparações.

Outros métodos amplamente empregados em ambiente SIG incluem o *Weighted Overlay*, no qual cada camada temática recebe um peso e é posteriormente integrada às demais para gerar um mapa síntese de aptidão territorial; a Lógica *Fuzzy*, que admite diferentes graus de pertinência e é útil quando os limites entre áreas favoráveis e desfavoráveis não são claramente definidos; e abordagens mais amplas de MCDA, que combinam diferentes métodos matemáticos e estatísticos para apoiar decisões envolvendo múltiplos objetivos.

A integração entre métodos multicritério e SIG representa uma das principais tendências da literatura voltada ao planejamento energético (SWARD *et al.*, 2021; YANG *et al.*, 2024), permitindo processar grandes volumes de informação espacial e representar os resultados por meio de mapas temáticos. Neste trabalho, adotou-se o AHP como método de ponderação, em razão de sua ampla utilização em estudos de planejamento territorial e de sua capacidade de incorporar, de forma estruturada, a importância relativa atribuída ao meio antrópico no problema de pesquisa.

A produção científica internacional recente reforça a relevância do nexo uso do solo-energia na seleção de áreas para usinas fotovoltaicas de grande porte. Ferreras-Alonso *et al.* (2024) demonstram, em estudo aplicado à União Europeia, que a expansão acelerada da geração solar sem políticas de planejamento territorial intensifica conflitos de uso do solo, podendo ser mitigada por meio de metodologias que antecipem essas restrições já na fase de seleção de áreas. Sekeroglu e Erol (2023) aplicam abordagem SIG-lógica *fuzzy* à seleção de sítios para empreendimentos híbridos de energia renovável, evidenciando a importância de critérios de planejamento espacial em escala municipal. Yang *et al.* (2024), em estudo sobre o potencial fotovoltaico de grande porte no planalto do Tibete, integram potencial geográfico e técnico em um único índice de aptidão, delimitando zonas prioritárias de desenvolvimento de forma conceitualmente análoga às Áreas Prioritárias (API) identificadas neste trabalho. Esses

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

estudos corroboram a abordagem adotada na MMEA-FV, na qual o meio antrópico é tratado como critério estruturante, e não apenas como restrição residual, na seleção de áreas para usinas fotovoltaicas centralizadas.

3. METODOLOGIA

3.1. Delineamento da pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa e qualitativa, com objetivos exploratórios e descritivos, fundamentada em revisão bibliográfica, análise documental e no desenvolvimento de uma metodologia multicritério para o mapeamento energoambiental de usinas fotovoltaicas centralizadas de grande porte (50 a 300 MW).

A pesquisa utiliza dados geoespaciais provenientes de bases oficiais, integrados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), possibilitando a análise espacial das variáveis energéticas, ambientais e antrópicas identificadas no referencial teórico. A metodologia foi organizada em etapas sequenciais — da definição da área de estudo à obtenção do índice de aptidão territorial —, culminando na classificação das áreas em diferentes níveis de aptidão e na análise crítica da contribuição de cada grupo de critérios.

Delimita-se o escopo deste trabalho à etapa de concepção e demonstração metodológica da MMEA-FV, não incluindo a execução completa do processamento geoespacial em escala operacional nem a validação estatística plena dos resultados, que são indicadas como etapas de continuidade da pesquisa. Essa delimitação é coerente com o caráter exploratório do estudo, cujo objetivo central é estruturar e testar, em um estudo de caso, a viabilidade de integrar sistematicamente critérios energéticos, ambientais e antrópicos em um único indicador de aptidão territorial. Em consequência, os valores quantitativos apresentados na Seção 4 têm natureza de estimativas demonstrativas, cujo procedimento de cálculo é detalhado na Seção 3.9.

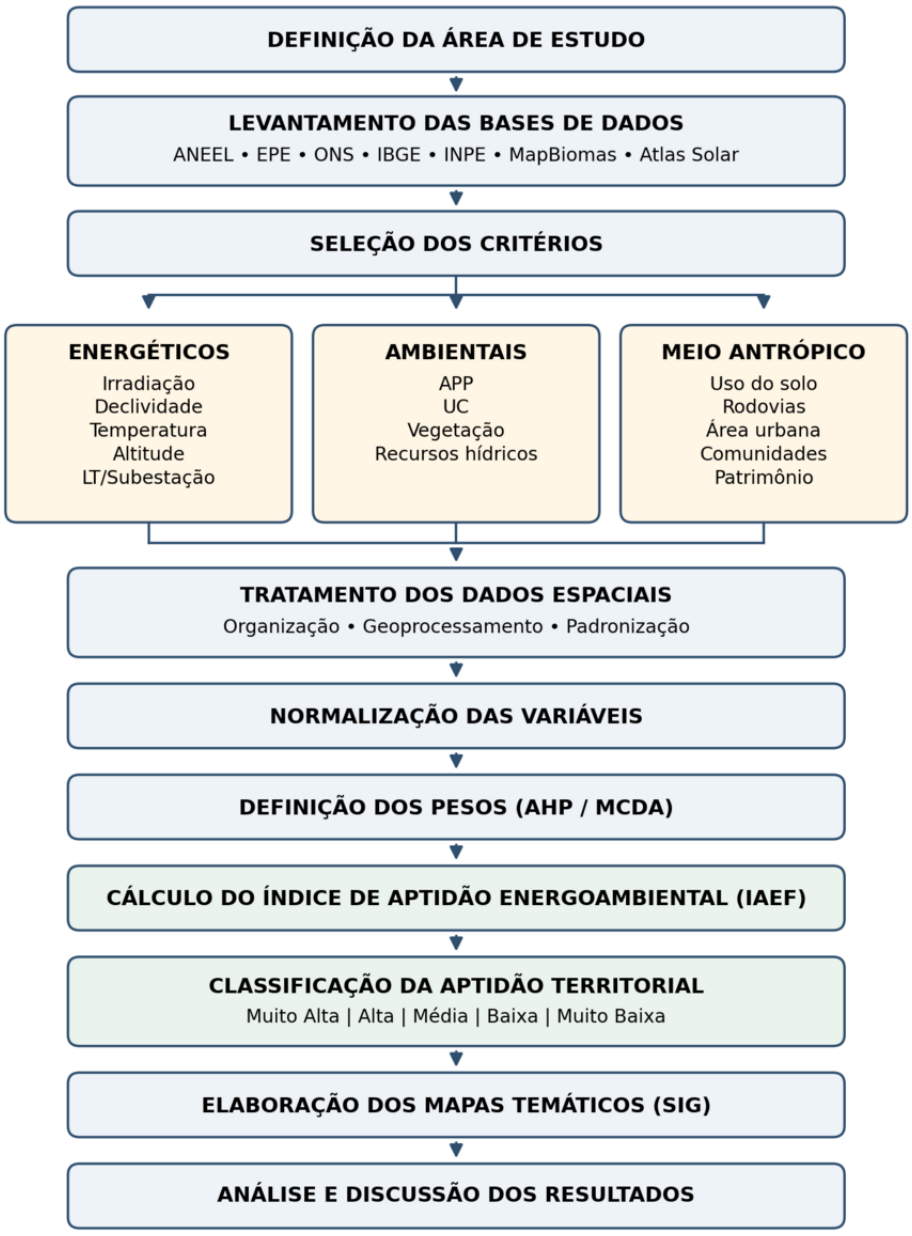
3.2. Estrutura da metodologia MMEA-FV

A MMEA-FV compreende oito etapas sequenciais (Figura 1): (i) definição da área de estudo; (ii) levantamento das bases de dados geoespaciais; (iii) seleção das variáveis de análise, organizadas nos três grupos de critérios; (iv) tratamento e padronização cartográfica dos dados; (v) normalização das variáveis para uma escala comum; (vi) definição dos pesos relativos de cada critério, por meio do método AHP; (vii) cálculo do Índice de Aptidão Energoambiental Fotovoltaica (IAEF); e (viii) classificação dos resultados em níveis de aptidão territorial e elaboração de mapas temáticos. Essa estrutura busca fornecer um procedimento transparente,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

reprodutível e tecnicamente fundamentado para apoiar o planejamento territorial, reduzindo a subjetividade do processo decisório.

Figura 1. Fluxograma da metodologia proposta (MMEA-FV)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.3. Seleção e tratamento das variáveis

As variáveis empregadas na MMEA-FV correspondem às apresentadas no Quadro 1, organizadas nos grupos energético, ambiental e antrópico. Após a seleção, todas as informações são convertidas para um ambiente geoespacial comum, garantindo compatibilidade cartográfica, e submetidas a procedimentos de padronização do sistema de referência geodésico, verificação da consistência topológica e controle de qualidade, reduzindo a propagação de erros nas etapas subsequentes da metodologia.

3.4. Normalização das variáveis

As variáveis consideradas apresentam diferentes unidades de medida e comportamentos em relação à aptidão territorial: enquanto algumas possuem relação diretamente proporcional à adequação da área (critérios de benefício), outras apresentam comportamento inverso (critérios de custo). Adotou-se a normalização linear no intervalo entre 0 e 1, na qual o valor 0 representa a menor aptidão e o valor 1 a condição mais favorável.

Para critérios de benefício, como a Irradiação Global Horizontal (GHI) e a disponibilidade de áreas já antropizadas, aplica-se a Equação (1):

$$N_i = (X_i - X_{mín}) / (X_{máx} - X_{mín}) \quad (1)$$

Para critérios de custo, como a distância a linhas de transmissão, a declividade elevada ou a proximidade de áreas urbanizadas, aplica-se a Equação (2):

$$N_i = (X_{máx} - X_i) / (X_{máx} - X_{mín}) \quad (2)$$

em que N_i é o valor normalizado da variável i, X_i o valor observado, e $X_{mín}$ e $X_{máx}$ os valores mínimo e máximo observados. Após a normalização, todas as variáveis passam a apresentar valores entre 0 e 1, eliminando distorções decorrentes das diferentes unidades de medida e permitindo sua integração consistente no cálculo do índice de aptidão.

3.5. Definição dos pesos dos critérios (AHP)

Para estabelecer a importância relativa de cada critério, adotou-se o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (SAATY, 1980), estruturando o problema em três níveis hierárquicos: o objetivo da pesquisa (identificação das áreas mais aptas), os três grupos de critérios (energético, ambiental e antrópico) e as variáveis específicas de cada grupo.

As comparações entre os grupos de critérios foram realizadas com a escala fundamental de Saaty (1 a 9), na qual o valor 1 representa igualdade de importância e os valores 3, 5, 7 e 9 indicam importância moderada, forte, muito forte e extrema, respectivamente. Considerando a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ênfase deste trabalho no meio antrópico, foi elaborada a matriz de comparação apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Matriz de comparação pareada entre os grupos de critérios (AHP)

Critério	Energético	Ambiental	Antrópico
Energético	1	2	1
Ambiental	1/2	1	1/2
Antrópico	1	2	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A partir da normalização da matriz e do cálculo do autovetor principal, obtiveram-se os pesos relativos apresentados na Tabela 2. O resultado reflete o objetivo central da metodologia: integrar o potencial energético e as características do meio antrópico sem desconsiderar as restrições ambientais, que atuam como fatores de restrição e compatibilidade territorial.

A definição do peso 0,20 para o grupo ambiental, inferior aos pesos 0,40 atribuídos aos grupos energético e antrópico, não decorre de uma menor importância atribuída à dimensão ambiental, mas do papel distinto que essa dimensão desempenha na estrutura da MMEA-FV. Parte significativa dos critérios ambientais considerados neste trabalho (como Áreas de Preservação Permanente e Unidades de Conservação, Quadro 1) corresponde a restrições legais de natureza binária, definidas pela legislação ambiental brasileira (Lei nº 12.651/2012, o Código Florestal) (BRASIL, 2012), que já operam como filtros de exclusão territorial independentemente da ponderação AHP, delimitando previamente o universo de áreas elegíveis para a análise multicritério. Dessa forma, o peso do grupo ambiental no IAEF não tem a função de reproduzir essas restrições, que continuam plenamente vigentes na etapa de tratamento das variáveis (Seção 3.3), mas de diferenciar, entre as áreas já ambientalmente elegíveis, aquelas relativamente mais ou menos favoráveis sob critérios como recursos hídricos e cobertura vegetal. Já os grupos energético e antrópico, cuja função é diferenciar o grau de aptidão técnica e de compatibilidade social entre áreas já elegíveis do ponto de vista ambiental, recebem peso mais elevado por corresponderem às dimensões que efetivamente determinam a viabilidade técnico-econômica e a aceitabilidade territorial do empreendimento, condição coerente com o enfoque do trabalho no meio antrópico, sem desconsiderar o potencial energético como determinante da viabilidade do projeto. Essa lógica é testada quanto à sua robustez por meio da análise de sensibilidade descrita na Seção 3.8.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Pesos relativos dos grupos de critérios

Grupo de critérios	Peso
Energéticos	0,40
Ambientais	0,20
Meio antrópico	0,40

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A confiabilidade dos julgamentos foi verificada por meio da Razão de Consistência (*Consistency Ratio* – CR), conforme Saaty (1980), sendo aceitos valores inferiores a 0,10. Como as linhas da matriz da Tabela 1 são proporcionais entre si, a matriz é perfeitamente consistente: o autovalor máximo é $\lambda_{máx} = 3{,}00$, o Índice de Consistência é $CI = (\lambda_{máx} - n) / (n - 1) = 0$ e, com o Índice Aleatório $RI = 0{,}58$ para $n = 3$, obtém-se $CR = CI / RI = 0$. Os pesos da Tabela 2 correspondem, portanto, exatamente ao autovetor principal normalizado (0,40; 0,20; 0,40) e podem ser reproduzidos diretamente a partir da Tabela 1, dividindo-se cada elemento pela soma de sua coluna (2,5; 5,0; 2,5) e calculando-se a média de cada linha.

3.6. Formulação do Índice de Aptidão Energoambiental Fotovoltaica (IAEF)

Propõe-se o Índice de Aptidão Energoambiental Fotovoltaica (IAEF), indicador sintético desenvolvido para representar, de forma quantitativa, a aptidão territorial de uma área para implantação de usinas fotovoltaicas centralizadas entre 50 MW e 300 MW. O IAEF é composto por três índices parciais — Índice Energético (IE), Índice Ambiental (IA) e Índice do Meio Antrópico (IAN) —, cada um obtido pela combinação ponderada das variáveis normalizadas do respectivo grupo, conforme as Equações (3), (4) e (5):

$$IE = \Sigma (w_i \times N_i) \quad (3)$$

$$IA = \Sigma (w_j \times N_j) \quad (4)$$

$$IAN = \Sigma (w_k \times N_k) \quad (5)$$

em que w_i, w_j e w_k representam os pesos internos de cada variável dentro de seu grupo, e N_i, N_j e N_k os respectivos valores normalizados. Os três índices parciais são então integrados no IAEF por meio da Equação (6):

$$IAEF = \alpha \cdot IE + \beta \cdot IA + \gamma \cdot IAN \quad (6)$$

em que α, β e γ correspondem aos pesos globais definidos pelo AHP (Seção 3.5): $\alpha = 0{,}40$; $\beta = 0{,}20$; $\gamma = 0{,}40$. Substituindo esses valores, obtém-se a expressão utilizada na metodologia:

$$IAEF = 0{,}40\ (IE) + 0{,}20\ (IA) + 0{,}40\ (IAN) \quad (7)$$

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O índice resultante varia entre 0 e 1: valores próximos de 1 indicam elevada aptidão territorial, enquanto valores próximos de 0 indicam áreas pouco favoráveis, por limitações energéticas, restrições ambientais ou conflitos relacionados ao meio antrópico. A decomposição do índice em três componentes independentes permite identificar quais dimensões mais influenciam a aptidão de cada área, além de possibilitar ajustes nos pesos e a incorporação de novas variáveis em aplicações futuras.

3.7. Classificação da aptidão territorial

Os valores do IAEF foram classificados em cinco categorias, permitindo identificar de maneira objetiva as áreas mais adequadas à implantação das usinas (Quadro 2).

Quadro 2. Classificação do Índice de Aptidão Energoambiental Fotovoltaica (IAEF)

Intervalo do IAEF	Classe de aptidão	Interpretação
0,80 – 1,00	Muito Alta	Áreas altamente recomendadas, com condições energéticas, ambientais e antrópicas favoráveis.
0,60 – 0,79	Alta	Áreas recomendadas, com pequenas restrições que não comprometem a viabilidade.
0,40 – 0,59	Média	Áreas potencialmente aptas, dependentes de estudos complementares.
0,20 – 0,39	Baixa	Áreas com limitações relevantes, exigindo medidas mitigadoras.
0,00 – 0,19	Muito Baixa	Áreas não recomendadas devido a restrições significativas.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Essa classificação permite a representação espacial dos resultados em mapas temáticos, elaborados em ambiente SIG, e possibilita analisar separadamente os três componentes do índice (IE, IA e IAN), identificando se determinada limitação decorre da disponibilidade do recurso solar, de restrições ambientais ou de características da ocupação humana. Optou-se por intervalos fixos, priorizando a simplicidade de interpretação e a reprodutibilidade da metodologia; em aplicações futuras, os limites entre classes poderão ser redefinidos por métodos estatísticos como quebras naturais (Jenks) ou quantis.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.8. Validação da metodologia

A validação da MMEA-FV é proposta por meio da comparação espacial entre as áreas classificadas como de alta aptidão pelo IAEF e a distribuição de usinas fotovoltaicas centralizadas já em operação ou autorizadas no Brasil, verificando se os empreendimentos existentes concentram-se predominantemente nas classes de Alta ou Muito Alta Aptidão. Essa análise é realizada em ambiente SIG, mediante o cruzamento espacial das coordenadas das usinas cadastradas em bases oficiais, como o Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2025), com o mapa de aptidão territorial, em consonância com os procedimentos usuais de avaliação de acurácia de classificações espaciais (FOODY, 2002).

Complementarmente, propõe-se uma análise de sensibilidade dos pesos do AHP, recalculando o IAEF a partir de cenários alternativos de ponderação entre os três grupos de critérios (Tabela 3), a fim de verificar a estabilidade da metodologia frente a variações nos parâmetros adotados. Caso pequenas alterações nos pesos produzam variações reduzidas na classificação final das áreas, a metodologia pode ser considerada robusta, ampliando sua credibilidade científica.

Tabela 3. Cenários para análise de sensibilidade do IAEF

Cenário	Energético	Ambiental	Antrópico
C1 – Base	0,40	0,20	0,40
C2	0,45	0,20	0,35
C3	0,35	0,20	0,45
C4	0,40	0,30	0,30
C5	0,30	0,30	0,40

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.9. Natureza demonstrativa e procedimento de cálculo das estimativas

Em coerência com o caráter exploratório definido na Seção 3.1, os resultados quantitativos apresentados na Seção 4 (Tabelas 4 e 5) constituem estimativas demonstrativas, elaboradas para exemplificar a aplicação sequencial das etapas da MMEA-FV, e não resultados de processamento geoespacial integral nem de validação empírica. Sua função é ilustrar a ordem de grandeza e a forma de apresentação dos produtos da metodologia; os valores definitivos dependem do processamento das camadas do Quadro 1 em ambiente SIG e dos procedimentos de validação e de sensibilidade descritos na Seção 3.8.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A distribuição de classes da Tabela 4 representa um cenário ilustrativo da forma como o mapa de aptidão é sintetizado após a classificação do IAEF (Quadro 2): em uma aplicação operacional, a área de cada classe é obtida pela contagem das células do mapa matricial atribuídas à classe, multiplicada pela área de cada célula, e a participação percentual resulta da razão entre essa área e a área total analisada. Os percentuais apresentados, portanto, exemplificam o produto esperado da metodologia e não devem ser interpretados como medição do território.

As estimativas de potência e de energia das Áreas Prioritárias (Tabela 5) seguem as Equações (8) e (9):

$$P = A / d \quad (8)$$

$$E = P \times Y \quad (9)$$

em que P é a potência estimada (MW), A é a área bruta da Área Prioritária (ha), d é a densidade de ocupação (ha/MW), E é a energia anual estimada (MWh/ano) e Y é a produtividade específica anual (MWh/MW·ano). Os valores da Tabela 5 correspondem a Y = 2.100 MWh/MW·ano, equivalente a um fator de capacidade de aproximadamente 24% (2.100 / 8.760 h), e a densidades de ocupação entre 7,0 e 8,3 ha/MW sobre a área bruta, valores deliberadamente conservadores, por considerarem que apenas parte de cada área seria efetivamente ocupada pelos arranjos fotovoltaicos, descontadas faixas de servidão, acessos, afastamentos e eventuais restrições internas. Esses parâmetros são premissas de referência adotadas para fins demonstrativos e devem ser substituídos, em aplicações operacionais, por simulação energética específica de cada sítio, a partir de séries de irradiação como as do INPE (2017) e do Banco Mundial (2024).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Área de estudo

A metodologia foi aplicada na Região Administrativa de Presidente Prudente, no extremo oeste do estado de São Paulo, escolhida por reunir características territoriais, energéticas e socioeconômicas representativas para o estudo de usinas fotovoltaicas centralizadas de grande porte: elevada disponibilidade do recurso solar, predominância de áreas agrícolas e de pastagens, relevo predominantemente plano a suavemente ondulado e infraestrutura elétrica compatível com a conexão de novos empreendimentos ao SIN.

A escolha dessa região também se justifica pelo fato de já concentrar, no cenário paulista, discussões sobre expansão da geração renovável em áreas de vocação agropecuária,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

o que a torna representativa dos dilemas territoriais enfrentados por empreendimentos fotovoltaicos de grande porte em outras regiões do interior do Brasil com perfil semelhante, permitindo que a metodologia proposta seja testada em condições próximas às esperadas em aplicações futuras.

A região é composta por municípios caracterizados pela predominância de atividades agropecuárias, favorecendo a disponibilidade de grandes áreas contínuas, requisito essencial para usinas entre 50 MW e 300 MW. O relevo predominantemente plano reduz a necessidade de terraplenagem e os custos de implantação, enquanto o clima tropical, com estação seca no inverno, proporciona índices de Irradiação Global Horizontal entre os mais elevados do estado de São Paulo. A região conta ainda com linhas de transmissão e subestações do SIN, favorecendo a conexão elétrica dos empreendimentos, e apresenta baixa densidade populacional nas áreas rurais, reduzindo potenciais conflitos de uso do solo, embora coexista com remanescentes de vegetação nativa, Áreas de Preservação Permanente e demais restrições ambientais, incorporadas ao modelo como critérios restritivos (Quadro 3).

Quadro 3. Características gerais da Região Administrativa de Presidente Prudente

Característica	Descrição
Localização	Oeste do Estado de São Paulo
Bioma predominante	Mata Atlântica (transição para o Cerrado)
Relevo	Plano a suavemente ondulado
Clima	Tropical, com inverno seco
Potencial solar	Elevado para os padrões do Estado de São Paulo
Uso predominante do solo	Agricultura e pecuária
Infraestrutura elétrica	Linhas de transmissão e subestações do SIN
Infraestrutura viária	Rodovias estaduais e federais
Principais restrições	APPs, cursos d'água, remanescentes florestais e unidades de conservação

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

4.2. Resultados por grupo de critérios

Após a normalização das variáveis e a aplicação dos pesos definidos pelo método AHP, são calculados os três índices parciais que compõem o IAEF. Nesta aplicação demonstrativa, o comportamento de cada grupo é descrito qualitativamente, com base nas características regionais (Quadro 3) e nas bases de dados indicadas no Quadro 1, sem o processamento integral das camadas em ambiente SIG (Seção 3.9).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

No grupo energético, a Irradiação Global Horizontal (GHI) tende a apresentar reduzida variabilidade espacial na região, o que indica condições favoráveis à geração fotovoltaica na maior parte da área de estudo. A declividade do terreno caracteriza-se pela predominância de áreas planas e suavemente onduladas, favorecendo a implantação dos módulos e reduzindo custos de terraplenagem. A proximidade de linhas de transmissão e subestações do SIN também contribui positivamente para a aptidão energética das áreas próximas à infraestrutura existente, enquanto a temperatura média anual, com pequena variação entre municípios, é incorporada como critério de custo por sua influência na eficiência dos módulos. A integração dessas variáveis resulta no Índice Energético (IE).

No grupo ambiental, as Áreas de Preservação Permanente e as Unidades de Conservação concentram-se principalmente ao longo dos cursos d'água e nas categorias de proteção integral, sendo tratadas como restrições de elevado peso; os recursos hídricos são igualmente considerados critério restritivo. A cobertura vegetal nativa apresenta distribuição fragmentada, coexistindo com extensas áreas antropizadas pela agropecuária, o que permite priorizar, no modelo, áreas já modificadas, reduzindo a necessidade de supressão vegetal. A integração dessas variáveis resulta no Índice Ambiental (IA).

No grupo do meio antrópico, verifica-se predominância de uso agropecuário do solo, indicando elevada disponibilidade de terrenos compatíveis com empreendimentos fotovoltaicos; as áreas urbanizadas são tratadas como zonas de baixa aptidão, com faixas de amortecimento associadas. A infraestrutura viária da região, composta por rodovias estaduais e federais, favorece a logística de implantação e manutenção, enquanto a baixa densidade populacional das áreas rurais reduz potenciais conflitos com a ocupação humana. A combinação dessas variáveis resulta no Índice do Meio Antrópico (IAN). O Quadro 4 sintetiza o comportamento de cada variável utilizada nos três grupos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 4. Síntese do comportamento das variáveis nos índices parciais (IE, IA, IAN)

Variável	Tipo de critério	Influência no respectivo índice
Irradiação Global Horizontal (GHI)	Benefício	Maximiza o potencial de geração
Distância a linhas de transmissão / subestações	Custo	Minimiza custos de conexão elétrica
Declividade	Custo	Reduz custos de implantação
Temperatura média	Custo	Minimiza perdas de eficiência dos módulos
Áreas de Preservação Permanente / Unidades de Conservação	Custo	Evita conflitos ambientais e legais
Recursos hídricos	Custo	Preserva corpos d'água
Uso do solo antropizado	Benefício	Prioriza áreas previamente modificadas
Rodovias	Benefício	Facilita o acesso logístico
Áreas urbanizadas / densidade populacional	Custo	Reduz conflitos com a ocupação humana
Comunidades tradicionais / patrimônio histórico-cultural	Custo	Evita interferências socioculturais

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

4.3. Índice de Aptidão Energoambiental Fotovoltaica e discussão

A integração dos três índices parciais, ponderados conforme os pesos definidos pelo AHP (0,40 para os critérios energéticos e antrópicos e 0,20 para os ambientais), permite gerar o mapa do Índice de Aptidão Energoambiental Fotovoltaica (IAEF) para a Região Administrativa de Presidente Prudente, classificado nas cinco categorias definidas na Seção 3.7. Na aplicação demonstrativa, as áreas de Alta e Muito Alta Aptidão tendem a concentrar-se predominantemente nas regiões rurais com elevada radiação solar, baixa declividade, reduzidas restrições ambientais e proximidade da infraestrutura elétrica; as de Baixa e Muito Baixa Aptidão tendem a associar-se principalmente a núcleos urbanos, Áreas de Preservação Permanente, Unidades de Conservação e regiões com limitações topográficas.

A distribuição ilustrativa das classes de aptidão (Tabela 4), obtida conforme o procedimento descrito na Seção 3.9, indica que aproximadamente 50,8% do território seria classificado nas categorias Alta e Muito Alta Aptidão, enquanto 24,5% corresponderia às categorias Baixa e Muito Baixa, associadas principalmente às restrições ambientais e às áreas urbanizadas. Esses percentuais têm caráter demonstrativo e não substituem o processamento geoespacial integral.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 4. Distribuição das classes de aptidão territorial na área de estudo (estimativa demonstrativa)

Classe de aptidão	Intervalo do IAEF	Área (km²)	Participação (%)
Muito Alta	0,80 – 1,00	3.174	19,0
Alta	0,60 – 0,79	5.311	31,8
Média	0,40 – 0,59	4.126	24,7
Baixa	0,20 – 0,39	2.405	14,4
Muito Baixa	0,00 – 0,19	1.684	10,1
Total	—	16.700	100,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2026). Nota: valores demonstrativos, conforme Seção 3.9.

A partir do mapa de aptidão, foram delimitadas, a título demonstrativo, três áreas contínuas prioritárias (API-01, API-02 e API-03), caracterizadas por elevada disponibilidade de radiação solar, reduzida declividade, acesso facilitado por rodovias, proximidade de linhas de transmissão e baixa ocorrência de restrições ambientais. A estimativa demonstrativa do potencial dessas áreas, calculada pelas Equações (8) e (9), é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Estimativa demonstrativa do potencial das áreas prioritárias identificadas

Área prioritária	Área (ha)	Potência estimada (MW)	Energia estimada (MWh/ano)
API-01	620	75	157.500
API-02	910	120	252.000
API-03	1.480	210	441.000
Total	3.010	405	850.500

Fonte: Elaborado pelos autores (2026). Nota: $P = A / d$ e $E = P \times Y$, com $Y = 2.100$ MWh/MW·ano e d entre 7,0 e 8,3 ha/MW (Seção 3.9).

O potencial total estimado, da ordem de 405 MW e 850 GWh/ano, ilustra a contribuição que a região poderia oferecer à expansão da matriz elétrica renovável do estado de São Paulo. Os locais delimitados combinam uso agropecuário consolidado, reduzida densidade populacional e boa infraestrutura logística, características que decorrem da incorporação sistemática dos critérios do meio antrópico ao modelo, e não apenas das restrições ambientais e do potencial solar. A confirmação desses valores depende do processamento integral e da validação previstos na Seção 3.8.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.4. Análise de sensibilidade e considerações sobre o escoamento de energia

Para avaliar a robustez do IAEF frente a variações na ponderação dos grupos de critérios, a Tabela 3 (Seção 3.8) propõe cinco cenários alternativos de pesos (C1 a C5). Os cenários C4 (0,40 energético; 0,30 ambiental; 0,30 antrópico) e C5 (0,30 energético; 0,30 ambiental; 0,40 antrópico) elevam em 50% o peso ambiental em relação ao cenário-base C1. Como as três Áreas Prioritárias (API-01, API-02 e API-03) já se caracterizam por baixa ocorrência de restrições ambientais relevantes (Seção 4.3), espera-se que permaneçam classificadas como Alta ou Muito Alta Aptidão sob C4 e C5, já que o aumento do peso ambiental tende a penalizar preferencialmente áreas com restrições mais expressivas, não as já prioritárias. O efeito mais provável é, portanto, uma redução na extensão total classificada como Alta/Muito Alta Aptidão (Tabela 4), concentrada nas zonas de transição entre classes, sem alteração na ordem de prioridade entre as API. A confirmação quantitativa depende do recálculo do IAEF em ambiente SIG (Seção 3.8), não realizado nesta aplicação demonstrativa.

Quanto ao escoamento de energia, a viabilização das API depende da capacidade de conexão à rede básica de transmissão e às redes de distribuição em tensão superior. O critério de proximidade a linhas e subestações, já incorporado ao grupo energético do IAEF (Quadro 1), funciona como *proxy* do custo de conexão, mas não substitui a análise formal de acesso do ONS (Pareceres de Acesso) nem dimensiona reforços na rede básica. O planejamento da expansão da transmissão identifica restrições de escoamento em regiões com elevada concentração de geração fotovoltaica e eólica, motivando obras adicionais licitadas em leilões de transmissão (EPE, 2024). Para os 405 MW mapeados (montante relevante frente à capacidade das subestações regionais, ainda que inferior a um único lote de leilão de grande porte), a viabilidade de conexão dependerá da margem de escoamento disponível, podendo exigir desde ampliações pontuais até participação em leilões de reforço, com impacto sobre custo e cronograma. Recomenda-se que aplicações operacionais futuras da MMEA-FV incluam a consulta aos estudos de acesso do ONS e da distribuidora local.

4.5. Impacto social da priorização territorial

Além de orientar a seleção de áreas com maior potencial energético, o IAEF permite estimar em que medida a metodologia contribui para reduzir o impacto social da expansão fotovoltaica. Do total de 16.700 km² considerados na aplicação demonstrativa, 24,5% da área foi classificada nas categorias Baixa e Muito Baixa Aptidão (Tabela 4), resultado associado majoritariamente à proximidade de núcleos urbanos, comunidades e outras restrições do meio antrópico. Em termos práticos, isso significa que a metodologia tende a identificar e excluir

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

previamente do foco de investimento uma parcela expressiva do território que, se ocupada por empreendimentos de grande porte, tenderia a gerar deslocamento de atividades produtivas, perda de renda para populações rurais e maior risco de judicialização, sem que essa exclusão dependa exclusivamente de restrições ambientais.

Por outro lado, as três áreas prioritárias (Tabela 5) foram delimitadas justamente por concentrarem uso agropecuário consolidado e baixa densidade populacional, o que reduz a probabilidade de conflito com moradias, atividades comerciais e patrimônio cultural. Assim, o IAN funciona não apenas como critério de exclusão de áreas inadequadas, mas como mecanismo de direcionamento do investimento para onde o custo social da implantação tende a ser mais baixo, o que constitui a principal contribuição prática pretendida por este trabalho.

4.6. Síntese dos resultados

Os resultados indicam que a MMEA-FV constitui uma ferramenta promissora de apoio ao planejamento territorial da geração fotovoltaica, ao integrar critérios técnicos, ambientais e socioeconômicos em um único indicador espacial, com potencial para subsidiar a tomada de decisão de órgãos governamentais, concessionárias, investidores e empresas do setor elétrico. Ressalta-se que os valores apresentados correspondem a uma aplicação demonstrativa (Seção 3.9); em uma aplicação operacional, deverão ser recalculados a partir de bases geoespaciais atualizadas e do processamento integral em ambiente SIG, incluindo a validação espacial e a análise de sensibilidade descritas na Seção 3.8.

Complementarmente, a decomposição do IAEF em seus três componentes sugere que, na área estudada, as limitações mais frequentes nas classes de Baixa e Muito Baixa Aptidão decorrem predominantemente de restrições ambientais e da proximidade de núcleos urbanos, e não da insuficiência do recurso solar, hipótese a ser confirmada no processamento integral. Esse padrão indica que, para a Região Administrativa de Presidente Prudente, o principal ganho metodológico da MMEA-FV está na incorporação explícita do meio antrópico, capaz de diferenciar áreas que seriam classificadas como equivalentes caso apenas critérios energéticos e ambientais fossem considerados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou a Metodologia de Mapeamento Energoambiental para Usinas Fotovoltaicas Centralizadas (MMEA-FV), desenvolvida com o objetivo de identificar áreas territorialmente aptas à implantação de empreendimentos fotovoltaicos de grande porte, com

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

potência instalada entre 50 MW e 300 MW. A metodologia foi estruturada a partir da integração de critérios energéticos, ambientais e do meio antrópico, empregando técnicas de análise multicritério em ambiente SIG e ponderação pelo método *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

A aplicação demonstrativa na Região Administrativa de Presidente Prudente evidenciou que a abordagem proposta permite integrar diferentes variáveis espaciais em um único índice de aptidão territorial — o Índice de Aptidão Energoambiental Fotovoltaica (IAEF) —, possibilitando delimitar áreas prioritárias que conciliam elevado potencial de geração solar, reduzidas restrições ambientais, infraestrutura elétrica disponível e menor potencial de conflitos relacionados ao uso e ocupação do solo.

Como principal contribuição científica, destaca-se a proposição da MMEA-FV como metodologia integrada que, diferentemente de abordagens restritas a aspectos energéticos ou ambientais, incorpora simultaneamente infraestrutura, meio ambiente e ocupação humana, oferecendo a órgãos públicos, concessionárias e investidores um instrumento capaz de antecipar e minimizar, já na concepção dos empreendimentos, impactos sobre comunidades, atividades produtivas e patrimônio cultural. Embora esta aplicação tenha finalidade acadêmica, a estrutura proposta é adaptável a outras regiões do Brasil, desde que utilizadas bases geoespaciais atualizadas e parâmetros compatíveis com as características locais, podendo subsidiar estudos de viabilidade técnica, planejamento energético regional e processos de licenciamento ambiental.

Reconhece-se, como limitação, o caráter demonstrativo desta aplicação, sem o processamento geoespacial completo em escala operacional nem a validação estatística frente a empreendimentos reais; por essa razão, os valores quantitativos apresentados (Tabelas 4 e 5) devem ser interpretados como estimativas demonstrativas, e não como validação empírica da metodologia. Além disso, os pesos atribuídos aos critérios se beneficiariam de calibração junto a especialistas do setor elétrico e de licenciamento ambiental.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação da MMEA-FV em diferentes regiões brasileiras, a calibração dos pesos dos critérios com especialistas do setor elétrico, a incorporação de variáveis econômicas e climáticas adicionais e a utilização de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para aprimorar os modelos de classificação territorial.

Conclui-se que a metodologia proposta apresenta potencial para apoiar o planejamento da expansão da geração fotovoltaica centralizada de forma tecnicamente consistente, ambientalmente responsável e territorialmente sustentável, contribuindo para o fortalecimento da transição energética e da participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas**. Brasília: ANA, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de Informações de Geração – BIG**. Brasília: ANEEL, 2025.

BANCO MUNDIAL. ***Global Solar Atlas 2.0***. Washington, DC: World Bank Group, 2024.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Sistema Nacional de Viação – SNV**. Brasília: DNIT, 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

FERRERAS-ALONSO, N.; CAPELLÁN-PÉREZ, I.; ADAM, A.; DE BLAS, I.; MEDIAVILLA, M. Mitigation of land-related impacts of solar deployment in the European Union through land planning policies. **Energy**, v. 302, 131617, 2024. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131617.

FOODY, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 185-201, 2002.

FUNDAÇÃO CULTURAL PALMARES (FCP). **Comunidades remanescentes de quilombos certificadas**. Brasília: FCP, 2025.

FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS (FUNAI). **Terras indígenas**: dados geoespaciais. Brasília: FUNAI, 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Bases Cartográficas Contínuas do Brasil – BC250**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). **Sistema Integrado de Conhecimento e Gestão – SICG**. Brasília: IPHAN, 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil (1991-2020)**. Brasília: INMET, 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. ***Geographic Information Systems and Science***. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas – Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. São Paulo: MapBiomas, 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). **Cadastro Nacional de Unidades de Conservação – CNUC**. Brasília: MMA, 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Sistema de Transmissão de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: ONS, 2025.

SAATY, T. L. ***The Analytic Hierarchy Process***. New York: McGraw-Hill, 1980.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental**: teoria e prática. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SEKEROGLU, A.; EROL, D. Site selection modeling of hybrid renewable energy facilities using suitability index in spatial planning. **Renewable Energy**, v. 219, pt. 1, 119458, 2023.

SILVA, J. X.; ZAIDAN, R. T. (org.). **Geoprocessamento e análise ambiental**: aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

SWARD, J. A.; NILSON, R. S.; KATKAR, V. V.; STEDMAN, R. C.; KAY, D. L.; IFFT, J. E.; ZHANG, K. M. Integrating social considerations in multicriteria decision analysis for utility-scale solar photovoltaic siting. **Applied Energy**, v. 288, 116543, 2021.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). ***Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Model***. Reston: USGS, 2023.

YANG, H.; XU, Y.; ZHOU, K.; LI, J. Mapping development potential and priority zones for utility-scale photovoltaic on the Qinghai-Tibet Plateau. **Renewable Energy**, v. 237, pt. A, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.