

SELEÇÃO ÓTIMA DE LOCAIS PARA USINAS AGROVOLTAICAS UTILIZANDO MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO BASEADOS EM SIG: UM ESTUDO DE CASO EM UMA REGIÃO DA ANDALUZIA, ESPANHA

Andressa de Sousa Cardoso – asousa@ujaen.es

Maria Isabel Ramos Galán

Francisco Ramón Feito Higuera

Juan Manuel Jurado

Universidade de Jaén, Espanha

Resumo. Com seu clima favorável para a produção solar, a Espanha é um local ideal para sistemas agrovoltáicos, que combina agricultura e sistemas fotovoltaicos para gerar energia renovável, mas a seleção inadequada de locais pode comprometer a produção. O estudo concentra-se na região da Andaluzia, Espanha, utilizando métodos de decisão multicritério baseados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). O objetivo é identificar locais economicamente viáveis e eficientes, considerando fatores restritivos e critérios de adequação espacial. A combinação de SIG e Tomada de Decisão Multicritério (MCDM) destaca-se na resolução de desafios complexos de localização. O SIG cria um banco de dados com dados de diversas organizações governamentais, sendo a base para sistemas de suporte à decisão. A metodologia inclui a análise e ponderação dos critérios por meio do Processo Hierárquico Analítico (AHP). Os resultados indicam que a abordagem proposta é eficaz na identificação de locais ideais para sistemas agrovoltáicos, promovendo a geração sustentável de energia e o aumento da produtividade agrícola. Essa integração estratégica demonstra o potencial de maximizar os benefícios tanto na produção de energia renovável quanto na prática agrícola sustentável, fortalecendo a resiliência do sistema energético e agrícola na região.

Palavras-chave: Agrovoltáica, Energia Solar, Sistemas de Informação Geográfica

1. INTRODUÇÃO

A Tecnologia Fotovoltaica Solar (PV) está em ascensão em todo o mundo, e a Espanha é o país com o maior desdobramento de PV na Europa em 2022, e o quinto maior do mundo; além disso, é o país com a maior porcentagem de energia solar na oferta elétrica mundial. Atualmente, há 45.000 MW de energia eólica e fotovoltaica instalados na Espanha. O objetivo do governo, estabelecido no Plano Nacional Integrado de Energia e Clima, é atingir 90.000 MW até 2030.

Por outro lado, de acordo com Amaducci *et al.* (2018), o crescimento populacional global está levando a uma demanda crescente por energia e alimentos. Isso está criando um conflito sobre o uso da terra, já que a terra necessária para grandes instalações de energia renovável não está disponível para a agricultura, levando a uma competição aumentada por terras agrícolas e invasão de florestas, afetando a segurança alimentar e os recursos florestais nacionais (Kumpanalaisatit *et al.* 2022). Portanto, a combinação de agricultura com fotovoltaicos, ou seja, sistemas agrovoltáicos, pode trazer benefícios econômicos e ambientais.

Os sistemas agrovoltáicos são uma forma de agricultura sustentável que combina a produção de culturas e a geração de eletricidade a partir de painéis solares fotovoltaicos na mesma área de terra (Marrou *et al.* 2013). Isso envolve a instalação de painéis solares em áreas agrícolas, permitindo a captação de energia solar enquanto a terra está sendo cultivada. Dessa forma, é possível obter uma dupla rentabilidade: por um lado, a geração de eletricidade a partir do sol, e por outro, a produção de culturas alimentares no mesmo espaço. Nestes sistemas, os painéis solares são instalados a uma altura adequada para permitir a entrada de luz solar necessária para o crescimento das culturas. Dependendo do tipo e localização do painel solar, os benefícios ambientais e econômicos são numerosos, desde otimização do uso da terra, redução da erosão do solo ou mitigação das mudanças climáticas através da produção de energia limpa, até a melhoria da eficiência no uso da água (Marrou *et al.* 2013). Além disso, esses sistemas também podem melhorar a qualidade do solo e aumentar a biodiversidade na área de cultivo (Marrou *et al.* 2013).

No entanto, a seleção do local ideal para a instalação de usinas agrovoltaicas pode ser desafiadora devido à variedade de critérios a serem considerados, como potencial solar, características topográficas, presença de infraestrutura, etc. Nesse sentido, métodos de decisão multicritério (MCDM) juntamente com ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (GIS) podem ser uma ferramenta útil para avaliar e selecionar os melhores locais (Lumby, 2015), (Kocabaldır *et al.* 2023), (Doorga *et al.* 2019), (Elboshy *et al.* 2022) e (Zambrano-Asanza *et al.* 2021). Várias técnicas de MCDM estão disponíveis na literatura; no entanto, a mais comumente usada na avaliação de locais de energia renovável é o Processo Hierárquico Analítico (AHP), de acordo com Albraheem *et al.* 2021.

O objetivo deste artigo é apresentar um estudo de caso sobre a seleção ideal de locais para usinas agrovoltaicas em uma região da Andaluzia, Espanha. Utiliza-se uma metodologia baseada em Sistemas de Informação Geográfica (GIS) e métodos de tomada de decisão multicritério para analisar e ponderar os critérios relevantes. Os resultados mostram que essa metodologia é eficaz na identificação de locais ideais, o que pode impulsionar a geração de energia renovável e melhorar a produtividade agrícola. Destaca a importância de combinar GIS e tomada de decisão multicritério para enfrentar problemas complexos de localização.

Em resumo, o artigo destaca como o uso de GIS e esses métodos pode ajudar a identificar locais adequados para a implementação de sistemas agrovoltaicos, considerando fatores produtivos, ambientais e regulatórios. Em termos estritos, o GIS é uma plataforma composta por hardware, software, dados espaciais e um administrador de sistema, com vários conjuntos de ferramentas para integração, armazenamento, manipulação, análise e visualização de dados espaciais, para revelar padrões, tendências e relações que podem não ser diretamente visíveis na forma original (Amin *et al.* 2016)

Neste artigo, criamos inicialmente um extenso banco de dados GIS com alta resolução espacial, coletando dados de várias organizações governamentais. Em seguida, foram selecionados quatro critérios e oito subcritérios, e seus pesos foram determinados usando o método AHP. Finalmente, usando ferramentas GIS, geramos mapas e conduzimos análises espaciais, resultando em um mapa das áreas mais adequadas para instalações de usinas fotovoltaicas.

Os resultados obtidos revelam que os municípios selecionados apresentam uma área promissora para a implementação de parques fotovoltaicos em larga escala, com 19% da área total da região identificada como locais muito adequados. Esses resultados são de grande importância para o governo espanhol ou governo local, pois permitirão desenvolver novas estratégias e identificar outros locais adequados para usinas fotovoltaicas em larga escala (maiores que 1000m²). Além disso, os resultados deste estudo são de grande interesse para investidores internacionais, especialmente aqueles especializados em PV.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A implementação bem-sucedida de sistemas agrovoltaicos exige uma abordagem metódica e estruturada. Nesta seção, apresentamos em detalhes a metodologia adotada para a seleção e avaliação dos locais ideais em nossa pesquisa na região de Andaluzia, especificamente na província de Jaén. A combinação de informações geográficas, dados agrícolas e critérios de seleção desempenham um papel crucial na identificação de áreas propícias para a integração de sistemas agrovoltaicos.

2.1 Área de estudo

A área de estudo abordada nesta pesquisa engloba 22 cidades da Província de Jaén, localizada na Andaluzia, sul da Espanha (Fig. 1). Sua escolha se fundamenta na vasta extensão de terra disponível, propícia para a instalação de painéis solares em larga escala, e no significativo número de fazendas dedicadas ao cultivo de oliveiras. Além disso, sua localização geográfica favorável, com uma latitude propícia e proximidade com o mar, proporciona um considerável número de horas de sol ao longo do ano, tornando-a ideal para a produção de energia fotovoltaica solar e respaldando a adequação para a implementação de sistemas agrovoltaicos.

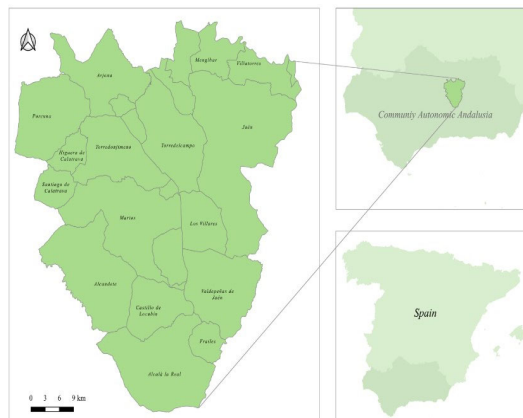


Figura 1 - Mapa de Localização

A Província de Jaén, segundo dados da Agência de Energia da Andaluzia, recebe uma média anual de 2.625 kWh/m² de radiação solar, consolidando-a como um local propício para a geração de energia solar.

A obtenção de dados sobre as parcelas agrícolas foi realizada por meio do Sistema de Informação Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC), uma ferramenta desenvolvida na Espanha para fornecer informações geográficas detalhadas sobre parcelas agrícolas e de criação de gado. O SIGPAC, fundamentado em um sistema de informação geográfica, possibilita a visualização e consulta de dados sobre localização, extensão, uso agrícola e outras características das parcelas.

Em síntese, a combinação estratégica de agricultura e produção de energia solar em sistemas agrovoltáicos apresenta-se como uma alternativa especialmente interessante para a Província de Jaén, dada a extensão significativa de terras dedicadas às oliveiras. A integração de sistemas agrovoltáicos nesses olivais não apenas permite que os agricultores gerem energia limpa, mas também preservem suas práticas agrícolas tradicionais. Essa abordagem inovadora não apenas poderia se traduzir em uma nova fonte de renda para os agricultores, mas também melhorar a produtividade da terra, contribuindo assim para a promoção de uma geração sustentável de energia. Adicionalmente, os elevados níveis de radiação solar na Província de Jaén a tornam um local ideal para a implementação de sistemas agrovoltáicos, otimizando o aproveitamento da luz solar durante o verão e inverno, o que, por sua vez, contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Conclui-se, portanto, que a implementação desses sistemas pode trazer benefícios significativos para os setores agrícola e energético, desempenhando um papel crucial na promoção do desenvolvimento sustentável na região.

2.2 Critérios de Exclusão e Seleção

A identificação dos fatores ou critérios utilizados para avaliar a adequação de um local é uma etapa crucial na análise. Esses critérios englobam elementos que impactam diretamente o desempenho da usina solar e os custos do projeto. Esses critérios podem ser categorizados em Critérios de Avaliação, que influenciam na adequação do local e Restrições, que são utilizadas para eliminar áreas inadequadas. Os critérios de exclusão (ou restrições) foram selecionados com base na revisão de trabalhos relacionados à localização ideal de usinas fotovoltaicas. Esse grupo de critérios abrange corpos d'água permanentes, áreas importantes como aeroportos e instalações militares, zonas protegidas como Áreas de Proteção Especial e centros urbanos, áreas de valor cultural e geo-recursos. A lista completa é apresentada na Tab. 1.

Tabela 1 – Critérios de exclusão.

Nº	Nome das camadas de restrição	Fonte
1	Centros Urbanos/Povoados/Edificações	DERA (Dados de Referência Espacial da Andaluzia)
2	Corpos d'água/Reservatórios/Rios	
3	Zona Militar	
4	Aeroporto	
5	Áreas Úmidas	
6	Rede Ecológica Europeia Natura 2000	
7	Proteção de Figuras	
8	Geo-Recursos	
9	Espaços Culturais	
10	Regime de Proteção	
11	Ativos Protegidos	
12	Ambientes Protegidos	
13	Proteção Especial	
14	Gasoduto	

Além dos critérios mencionados na Tab. 1, há outros critérios que restringem determinadas áreas. É essencial considerar condições técnicas e ambientais. Conforme o Guia para a Elaboração de Estudos de Impacto Ambiental para Projetos de Usinas Solares Fotovoltaicas e suas Infraestruturas de Evacuação, publicado em março de 2022 pela Subdireção Geral de Avaliação Ambiental, foram consideradas zonas de buffer específicas (Tab. 2):

Tabela 2 – Critérios de Exclusão (Buffers)

Nº	Nome das camadas de restrição
1	Buffer de 50 m de estradas
2	Buffer de 100 m de rios

3	Buffer de 200 m de área residenciais
4	Buffer de 10 m de gasodutos
5	Aspectos não orientados para o Sul
6	Áreas com inclinação superior a 5°

Todas essas áreas (Fig. 2) foram excluídas da área de estudo.

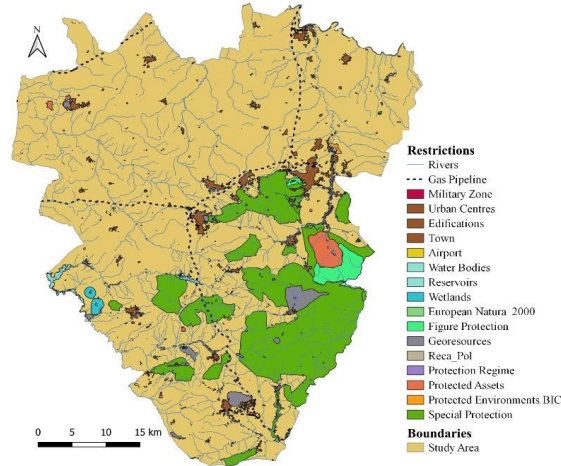


Figura 2 - Camadas dos critérios de restrição

Por outro lado, os critérios para a seleção da área mais adequada (Fig. 3) foram escolhidos com base em estudos anteriores e divididos em diferentes categorias: Climatologia, Orografia e Localização. Neste estudo, a categoria climática inclui Radiação Solar (GHI) e temperatura média anual. A categoria de orografia inclui a inclinação do terreno e os aspectos ou orientação do terreno. A categoria de localização inclui a distância a áreas construídas, distância de estradas e distância de linhas de energia. Essa lista de critérios foi submetida à aprovação de um grupo de especialistas em parques solares fotovoltaicos.

Com base nisso, estabelecemos a lista final de critérios para a seleção do local da usina solar. As subseções a seguir descrevem detalhadamente a definição e importância de cada critério.

Critério C1 - Inclinação (%): Locais com inclinação acentuada devem ser evitados ao escolher uma área para implantação de uma usina de energia solar, pois isso pode dificultar a instalação de painéis solares, e terrenos mais planos receberão mais radiação. De acordo com Wang *et al.* (2016), campos com inclinação inferior a 5° são necessários para garantir que todos os módulos fotovoltaicos possam ser instalados em um ângulo ótimo, atendendo assim aos requisitos técnicos necessários.

Para a geração dessa camada, o Modelo Digital de Terreno que cobre toda a região de pesquisa, com um tamanho de célula de 100x100 metros, foi baixado do DERA. Em seguida, a ferramenta de inclinação do QGIS foi utilizada.

Critério C2 - Aspectos: A orientação do terreno é um fator importante a ser considerado ao planejar uma usina fotovoltaica (PV). A orientação ideal para uma usina fotovoltaica é ter seus painéis solares voltados para o sul (no Hemisfério Norte) ou norte (no Hemisfério Sul), com um ângulo de inclinação igual à latitude do local. Essa orientação permite que os painéis capturem a quantidade máxima de radiação solar ao longo do dia.

Para a geração dessa camada, o Modelo Digital de Terreno que cobre toda a região de pesquisa, com um tamanho de célula de 100x100 metros, foi baixado do DERA. Em seguida, a ferramenta de aspectos do QGIS foi utilizada.

Critério C3 - Irradiação Horizontal Global (kWh/m2): A radiação solar é o fator-chave na busca por locais ótimos para usinas de energia solar, pois esses locais devem receber luz solar suficiente durante todo o ano para garantir uma produção eficaz de energia solar (Azevêdo *et al.* 2017). Os dados raster de Irradiação Horizontal Global, com uma resolução espacial de aproximadamente 250 m, foram obtidos no site "Global Solar Atlas" (<https://globalsolaratlas.info/map>). A IHG tem cobertura anual, uma resolução de aproximadamente 250 m e é fornecida como dados raster no formato GeoTIFF.

Critério C4 - Temperatura Média (°C): O desempenho das células fotovoltaicas pode ser impactado negativamente pelo aumento das temperaturas. A temperatura ideal para a produção ótima de energia solar

geralmente é considerada abaixo de 25°C. Quando as temperaturas ultrapassam esse valor, a eficiência das células pode diminuir, levando a uma redução na produção total de energia.

A temperatura do ar a 2 m de altitude tem a mesma fonte que a IHG (Global Solar Atlas), possui cobertura anual e uma resolução de cerca de 1 km.

Os três critérios seguintes são baseados em distância. Para otimizar a localização desse tipo de instalação:

Critério C5 - Distância a Estradas (m): A distância para estradas refere-se à distância da usina fotovoltaica para a estrada mais próxima. É importante porque afeta a acessibilidade da usina e a facilidade com que os painéis solares e outros equipamentos podem ser transportados (Rediske *et al.* 2019). Para minimizar os custos de construção de estradas e seu impacto negativo no meio ambiente, é aconselhável escolher um local localizado o mais próximo possível das principais estradas.

A rede viária foi baixada do DERA, do conjunto de informações de Transporte e Comunicações. Contém informações sobre o layout da rede viária existente na Andaluzia e está disponível em formato shapefile linear.

Critério C6 - Distância a Linhas de Transmissão (m): A distância para linhas de energia de alta voltagem é a distância física que deve existir entre uma usina fotovoltaica e as linhas de energia para garantir a segurança e eficiência da instalação. Manter uma distância adequada pode garantir maior eficiência e rentabilidade da usina, minimizando as perdas de energia no processo de transmissão da eletricidade gerada. Linhas de transmissão com capacidade de carga são necessárias o mais próximo possível de uma usina de energia solar, porque o custo de construção de novas linhas de energia é geralmente alto, além de minimizar a perda de energia na transmissão (Rediske *et al.* 2019).

As linhas de transmissão também foram baixadas do DERA, do conjunto de informações de Infraestruturas Energéticas e Ambientais. Disponível em formato shapefile linear.

Critério C7 - Distância a Áreas Residenciais (m): Os preços das terras costumam ser mais altos em áreas urbanas, o que pode dificultar ou encarecer a aquisição de terras adequadas para uma usina fotovoltaica. Além disso, pode haver restrições de zoneamento e uso do solo em áreas urbanas que limitam os tipos de atividades permitidas, incluindo projetos de energia renovável. Por outro lado, a distância para centros urbanos pode afetar o custo de conexão da usina fotovoltaica à rede elétrica. Quanto mais distante a usina fotovoltaica estiver do ponto de conexão mais próximo à rede, mais caro será construir linhas de transmissão para conectar a usina à rede. Isso pode ter um impacto significativo no custo total da usina fotovoltaica. Portanto, quanto mais próxima a usina estiver da área residencial, melhor, mas é muito importante considerar uma zona de buffer.

As áreas residenciais também foram baixadas do DERA, do conjunto de informações do Sistema Urbano. Contém informações sobre a localização de centros urbanos, edifícios e povoados. Disponível em formato shapefile poligonal.

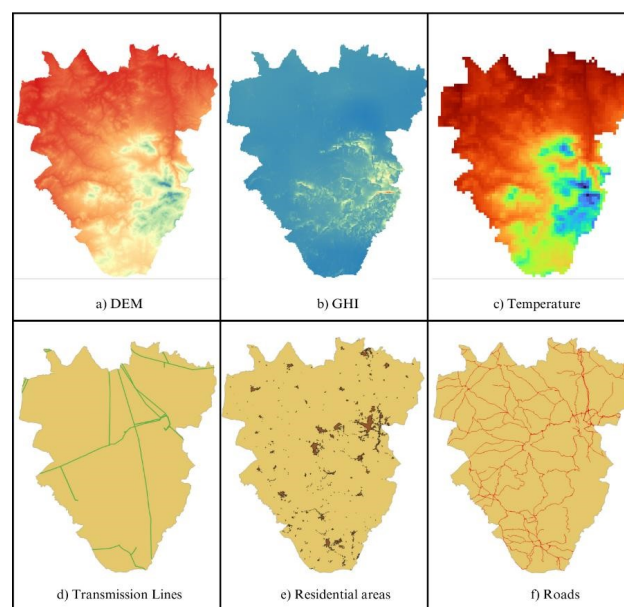


Figura 3 – Camadas dos critérios de seleção

Finalmente, os dados cadastrais coletados da Sede Eletrônica do Cadastro da Espanha foram compilados para obter informações a nível de lote para toda a região de estudo. O Cadastro é gerenciado pela Direção Geral do Cadastro, e suas informações são fundamentais para a administração fiscal e o desenvolvimento urbano na Espanha. Elas se referem a informações detalhadas e precisas sobre propriedades imobiliárias e terras em toda a Espanha. Foram selecionados somente os lotes onde existe o cultivo de oliveiras.

2.3 Análises Espaciais

Uma vez que os critérios foram definidos, é essencial obter as camadas temáticas por meio de geoprocessamento no software QGIS. O objetivo é transformar os dados coletados em informações úteis para o estudo. Para isso, foram combinadas técnicas de SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e MCDM (Método de Tomada de Decisão Multicritério) para avaliar a adequação de locais para a instalação de painéis solares. A metodologia envolveu a coleta de dados, seguida pela análise espacial utilizando diversos métodos, como análise de superfície e operações geométricas e de distância.

A Fig. 4 mostra os mapas de critérios após a aplicação dos métodos de análise espacial descritos abaixo e a classificação. A Inclinação (C1) e Aspectos (C2) foram calculados usando o MDT como camada de entrada para a ferramenta de Inclinação e Aspecto (respectivamente) do QGIS. A Irradiação Horizontal Global (C3) foi baixada diretamente do site "Global Solar Atlas". A Temperatura Média (C4) também foi obtida diretamente do site "Global Solar Atlas". A Distância para estradas (C5), Distância para linhas de transmissão (C6) e Distância para áreas residenciais (C7) foram calculadas usando a ferramenta de distância euclidiana do QGIS. É um método que calcula um valor de distância para cada pixel, ou seja, a distância entre os vetores (centros urbanos, linhas de energia e estradas) e os pixels do raster criado.

O próximo passo (Classificação) é padronizar todas as camadas para uma escala comum. Isso ocorre porque todos os critérios mencionados anteriormente têm valores e faixas diferentes e precisam de uma escala comum para serem integrados a um mapa. Portanto, todos os critérios foram reclassificados em 10 classes, de 1 a 10, onde 1 é o mais adequado e 10, o menos adequado. O método de reclassificação foi aplicado em intervalos iguais para todas as camadas, exceto para as camadas de Aspecto e Inclinação, pois algumas restrições foram consideradas. Assim, na camada de Aspecto, a orientação sul foi considerada como 1 e todas as outras direções como 10. Na camada de inclinação, todas as inclinações maiores que 5 graus receberam 1 e todas as outras, 10.

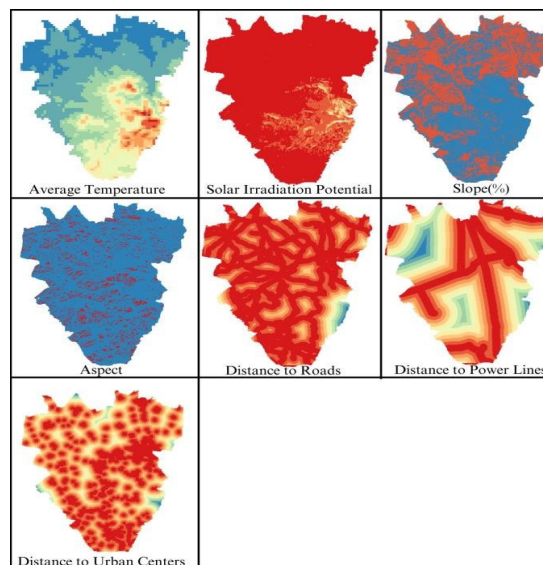


Figura 4 – Camadas geoprocessadas e classificadas

2.4 MCDM Utilizando uma Abordagem AHP

Esta pesquisa emprega o método AHP combinado com o uso de SIG para determinar os locais mais adequados para a instalação de uma usina agrovoltáica em um conjunto de cidades na província de Jaén. Embora existam várias abordagens de MCDM, como TOPSIS e WLC, em estudos de energia renovável, o AHP é preferido por fornecer resultados precisos.

Trata-se de um método quantitativo para tomada de decisões multicritério, que possibilita a geração de escalas de prioridade com base em julgamentos de especialistas expressos por meio de comparações par a par, utilizando uma escala de preferência. Ou seja, o AHP é um procedimento em que cada critério recebe um nível com base em uma comparação par a par na matriz para determinar os pesos relativos de cada um. A matriz permite comparar a importância de cada

elemento relativo e calcular o peso de cada índice em relação aos objetivos gerais, simplificando assim o processo de tomada de decisões.

A avaliação das comparações par a par é feita utilizando valores sequenciais de 1 (importância igual) a 9 (importância extrema) (Tab. 3). Isso reduz possíveis erros que podem ocorrer durante a avaliação multicritério e pode lidar com julgamentos inconsistentes.

Tabela 3 – Tabela de importâncias dos critérios

Significado	Valores
C _i é igualmente importante que C _j	1
C _i é ligeiramente mais importante que C _j	3
C _i é significativamente mais importante que C _j	5
C _i é muito significativamente mais importante que C _j	7
C _i é extremamente mais importante que C _j	9
Valores intermediários	2, 4, 6, 8

Depois de criar a matriz de comparação, a próxima etapa é derivar a matriz de comparação par a par normalizada. A matriz deve ser igual a 1. Isso pode ser obtido calculando s_{jk} para cada célula da matriz usando a Eq (1).

$$s_{jk} = \frac{a_{jk}}{\sum_{j=1}^n a_{jk}} \quad (1)$$

Para determinar o vetor de peso do critério (W_j), foi usada a Eq (2). O vetor de peso do critério W_j é calculado pela média das linhas para obter os pesos relativos, em que m é o número de valores na linha.

$$W_j = \frac{\sum_{j=1}^n s_{jk}}{m} \quad (2)$$

Por fim, um índice de consistência (CR) precisa ser calculado para que a matriz avalie a consistência do julgamento dos especialistas. O grau de consistência na análise é considerado aceitável se o CR for $\leq 10\%$. Se o $CR > 10\%$, os julgamentos devem ser revisados para identificar e corrigir a fonte da inconsistência; portanto, para fornecer um nível aceitável de consistência, o valor do CR deve ser sempre $\leq 10\%$. O CR é dado pelas Eq (3) e (4) abaixo.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{med} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Em que λ_{med} é a média dos vetores e n é o tamanho da matriz. O RI representa os valores do índice de consistência aleatório, dependendo do número de critérios n considerados em M. O valor do RI é mostrado na Tab. 4.

Tabela 4 – Valores de RI

N	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

Como dito anteriormente, a etapa inicial envolve a criação do modelo. Ao estruturar o modelo, é possível ter uma compreensão mais clara dos critérios de avaliação e de tomada de decisão. Na etapa seguinte, é construída a matriz de comparação par a par (PCM), que será uma matriz quadrada, ou seja, $n \times n$. De acordo com o modelo criado, $n=7$ e a matriz pode ser vista na Tab. 5. O peso de cada um dos critérios foi definido de acordo com estudos anteriores e características da área de estudo e da configuração agrovoltaica.

Tabela 5 – Tabela de importâncias dos critérios

Critério	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1	2	3	4	7	6	5
C2	$\frac{1}{2}$	1	2	3	6	5	4
C3	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	2	5	4	3
C4	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	1	4	3	2
C5	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$
C6	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	2	1	$\frac{1}{2}$
C7	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	3	2	1

Como resultado final, o vetor de prioridade relativa foi (Tab. 6)

Tabela 6 – Tabela de pesos

C1	0,354	35,44%
C2	0,240	24,00%
C3	0,159	15,85%
C4	0,104	10,36%
C5	0,031	3,11%
C6	0,045	4,49%
C7	0,068	6,75%

O raio de consistência teve como resultado um valor de 0,03, que é menor que 0,1. Portanto, a matriz é consistente. Uma vez definidos os pesos para cada critério e, foi gerado um mapa por meio de uma soma ponderada, em que cada raster, criado nas seções anteriores, foi multiplicado por seu peso correspondente. Dessa área, as restrições, já mencionadas acima, também foram removidas.

3. RESULTADOS

O objetivo deste estudo foi identificar locais adequados para usinas agrovoltaicas em uma região da província de Jaén, compreendendo 22 municípios. Cinco critérios básicos (DEM, estrada principal, linhas de energia, áreas construídas e temperatura) foram utilizados para derivar três critérios adicionais (inclinação, aspecto e radiação solar) por meio de

várias técnicas de processamento geoespacial. Todos esses critérios foram reclassificados em uma faixa comum de 1 a 10, onde 1 representa o valor mais adequado e 10 o pior. Além disso, todos os critérios foram sobrepostos levando em consideração seus valores ponderados. Esses valores ponderados foram calculados usando a técnica MCDM-AHP. O QGIS foi o software SIG utilizado para o processamento.

Para a produção do mapa de adequação, sete fatores foram estabelecidos como critérios de decisão. Os resultados obtidos foram $RI = 1,32$ e $CR = 0,03$, dentro da faixa aceitável. Foram atribuídos pesos a cada critério, sendo assim, a radiação solar tem um peso de 35%, tornando-se o fator mais influente no resultado final. Em seguida, vem a temperatura com um peso de 23% e a inclinação com um peso de 15%.

A Fig. 5 mostra os resultados da soma ponderada dos critérios de acordo com os pesos calculados, onde valores baixos e vermelhos escuros indicam as áreas mais adequadas. A faixa resultante de adequação vai de 141, indicando a maior adequação, a 852, conforme mostrado na Fig. 5. Essa faixa é uma combinação de todos os critérios classificados em 10 classes de 1 a 10, onde 1 é a classe mais adequada, como mencionado anteriormente.

Conforme mostrado na Fig. 5, as áreas mais adequadas e também as altamente adequadas estão localizadas no sul e oeste. Isso se deve à temperatura mais baixa e maior radiação solar, bem como áreas com menos relevo, alta densidade de estradas, linhas de energia e centros urbanos. Por outro lado, nas áreas do Noroeste, predominam os valores são menores; isso pode ser devido à menor densidade de linhas de energia e centros urbanos, além de valores de irradiação mais baixos.

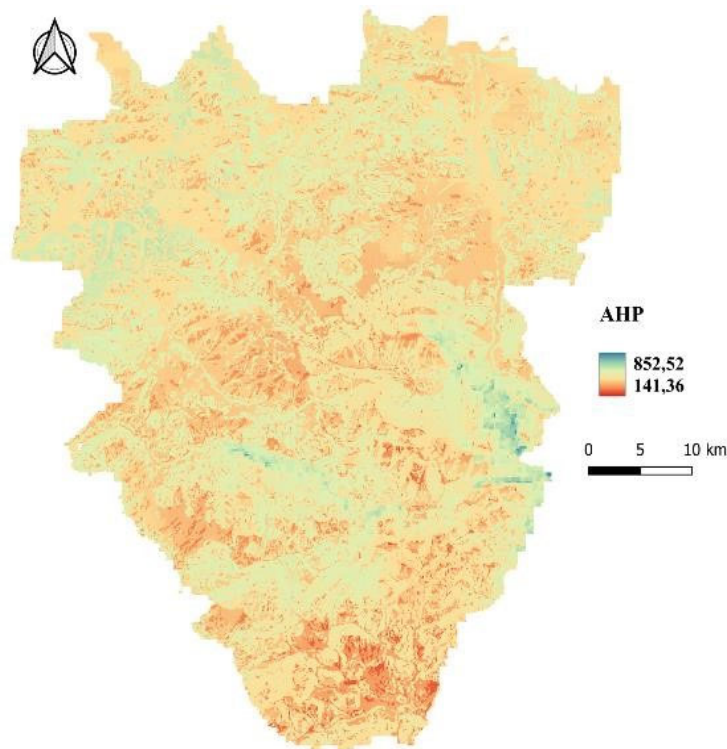


Figura 5 – Resultado da soma ponderada de acordo com os pesos do AHP.

4. CONCLUSÃO

A análise de adequação do local ideal de uma usina solar realizada neste estudo pode ser um passo proativo para ajudar os tomadores de decisão a encontrar e selecionar os locais mais adequados para desenvolver sistemas agrofotovoltaicos na região da Andaluzia, seja para sistemas fotovoltaicos em pequena escala ou em larga escala.

O estudo consistiu em três passos principais: O primeiro envolve a coleta de dados, incluindo a identificação da área de estudo e a definição dos critérios. O segundo passo abrange o processo de análise espacial, como análise de superfície e operações geométricas e de distância. Isso é seguido pelo terceiro passo, que é o suporte à decisão espacial, onde o processo analítico hierárquico (AHP) é utilizado. Finalmente, o quarto passo é a criação do mapa de áreas ideais.

Em trabalhos futuros, diferentes critérios de avaliação, como umidade, população e tempestades de poeira, podem ser considerados para obter um mapa de adequação mais completo. Além disso, o algoritmo Fuzzy AHP poderia ser utilizado e avaliado para obter outro mapa de adequação. Recomenda-se também realizar estudos em diferentes regiões da Espanha e fornecer os resultados correspondentes.

Este estudo contribui significativamente para o campo da agrovoltaica, fornecendo uma metodologia eficaz e prática para identificar locais ótimos de usinas agrovoltaicas em uma região específica, considerando critérios de produtividade, ambientais e regulatórios. Ao integrar abordagens de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e métodos de decisão multicritério, este estudo demonstra como lidar efetivamente com problemas complexos de localização no contexto de energia renovável e agricultura sustentável. Os resultados obtidos têm o potencial de orientar a tomada de decisões informadas e promover a geração de energia sustentável junto com práticas agrícolas benéficas.

REFERÊNCIAS

- Amin, M. S., & Noori, A. (2016). Mechanism for farm mechanization and careful planning using geographic information system (GIS). *J. Bus. Technovation*, 4(1), 23-28.
- Azevêdo, Verônica Wilma B., Ana Lúcia B. Candeias, and Chigueru Tiba. 2017. "Estudio de Ubicación de Central Termosolar en el Estado de Pernambuco Utilizando Tecnologías de Geoprocesamiento y Análisis de Criterios Múltiples" *Energies* 10, no. 7: 1042. <https://doi.org/10.3390/en10071042>
- Bahaa Elboshy, Mamdooh Alwetaishi, Reda M. H. Aly, and Amr S. Zalhaf. A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3):101618, May 2022.
- Canan Kocabaldır and Mehmet Ali Yücel. GIS-based multicriteria decision analysis for spatial planning of solar photovoltaic power plants in Çanakkale province, Turkey. *Renewable Energy*, 212:455–467, August 2023.
- H. Ebru Colak, Tugba Memisoglu, and Yasin Gercek. Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy*, 149:565–576, April 2020.
- H. Marrou, L. Guillioni, L. Dufour, C. Dupraz, and J. Wery. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177:117–132, August 2013.
- Jay R. S. Doorga, Soonil D. D. V. Rughooputh, and Ravindra Boojhawon. Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable Energy*, 133:1201–1219, April 2019.
- Lamya Albraheem and Leena Alabdulkarim. Geospatial Analysis of Solar Energy in Riyadh Using a GIS-AHP-Based Technique. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5):291, May 2021. Number: 5 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- LUMBY, Ben. Utility-scale solar photovoltaic power plants: a project developer's guide. The World Bank, 2015.
- Manoch Kumpanalaisatit, Worajit Setthapun, Hathaitip Sintuya, Adisak Pattiya, and Surachai Narrat Jansri. Current status of agrivoltaic systems and their benefits to energy, food, environment, economy, and society. *Sustainable Production and Consumption*, 33:952–963, September 2022.
- Rediske, G., Siluk, J.C.M., Gastaldo, N.G., Rigo, P.D., Rosa, C.B., 2019. Determinant factors in site selection for photovoltaic projects: A systematic review. *Int. J. Energy Res.* 43, 1689–1701.
- S. Zambrano-Asanza, J. Quiros-Tortos, and John F. Franco. Optimal site selection for photovoltaic power plants using a GIS-based multi-criteria decision making and spatial overlay with electric load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143:110853, June 2021.
- Stefano Amaducci, Xinyou Yin, and Michele Colauzzi. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220:545–561, June 2018.
- Wang, S., et al. (2016). Selecting photovoltaic generation sites in Tibet using remote sensing and geographic analysis. *Solar Energy*, 133, 85–93.

OPTIMAL SITE SELECTION FOR AGRO-VOLTAIC PLANTS USING MULTICRITERIA DECISION METHODS BASED ON SIG: A CASE STUDY IN A REGION OF ANDALUSIA, SPAIN.

Abstract. *With its favourable climate for solar production, Spain is an ideal location for agrovoltaic systems, which combine agriculture and photovoltaic systems to generate renewable energy, but inadequate site selection can compromise production. The study focuses on the region of Andalusia, Spain, using multi-criteria decision methods based on Geographic Information Systems (GIS). The aim is to identify economically viable and efficient sites, taking into account restrictive factors and spatial suitability criteria. The combination of GIS and Multicriteria Decision Making (MCDM) stands out in solving complex localisation challenges. GIS creates a database with data from various government organisations and is the basis for decision support systems. The methodology includes analysing and weighting the criteria using the Analytical Hierarchy Process (AHP). The results indicate that the proposed approach is effective in identifying ideal sites for agro-voltaic systems, promoting sustainable energy generation and increasing agricultural productivity. This strategic integration demonstrates the potential to maximise the benefits of both renewable energy production and sustainable agricultural practice, strengthening the resilience of the energy and agricultural system in the region.*

Keywords: *Agrovoltaics, Solar Energy, Geographic Information Systems*