

OTIMIZAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE PARQUES SOLARES NUMA PERSPETIVA DE SUSTENTABILIDADE. PROPOSTA DE ÍNDICE ESPACIAL EM PORTUGAL CONTINENTAL

ANDRÉ ALVES ¹ 

EDUARDA MARQUES DA COSTA ^{1,2} 

EDUARDO GOMES ^{1,2} 

SAMUEL NIZA ³ 

RESUMO – Um dos principais desafios no desenvolvimento de centros eletroprodutores renováveis prende-se com a sua localização. Essa decisão está intrinsecamente ligada à necessidade de equilibrar a disponibilidade de recursos com outros usos. No atual contexto de transição energética, a produção de energia renovável terá de crescer significativamente para a descarbonização do sistema elétrico. Em Portugal, as metas do Plano Nacional Energia e Clima (PNEC) determinam que a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica existente até 2022 tem de crescer cerca de oito vezes até ao final da década. Antecipam-se por isso significativas transformações territoriais e alterações nas paisagens com uma crescente procura por solo que gerará competição territorial e impactes nos ecossistemas. Este estudo apresenta uma proposta de identificação de localizações para a implantação de infraestruturas de produção de energia solar fotovoltaica em linha com princípios de sustentabilidade e posterior avaliação dos projetos previstos. A análise foi desenvolvida em duas fases: a primeira com recurso a uma análise multicritério (AMC) em sistemas de informação geográfica (SIG) em que se desenvolveu um índice espacial que classifica o território continental português pela aptidão a uma localização sustentável para centrais solares fotovoltaicas; a segunda, que identificou a localização dos projetos previstos (centrais licenciadas e a aguardar licenciamento com potência ≥ 1 MW) numa ótica de monitorização *ex-ante*, pelo cruzamento com o índice obtido. A abordagem adotada constitui um protótipo de um sistema espacial de apoio à decisão face aos desafios territoriais da produção de energia renovável. Conclui-se que a localização das propostas de futuras centrais solares foi escolhida predominantemente com base num racional técnico-económico, sem considerar devidamente os impactes destas infraestruturas noutras dimensões do desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Geografia da energia; energia solar; transição energética; análise multicritério; SIG; Portugal continental.

ABSTRACT – OPTIMISING THE LOCATION OF SOLAR PARKS FROM A SUSTAINABILITY PERSPECTIVE. PROPOSAL OF A SPATIAL INDEX. One of the main challenges in the development of renewable energy centers is the location. This decision is intrinsically linked to the need of balancing resource availability with other uses. In the current context of energy transition, renewable energy production must increase significantly in order to decarbonize the electricity system. In Portugal, the objectives of the National Energy and Climate Plan (NECP) stipulate that the installed capacity of photovoltaic solar energy by 2022 must increase around eightfold until the end of the decade. Therefore, significant territorial transformations and landscape changes are expected, with an increasing demand for land that will generate territorial competition and impacts on ecosystems. The study presents a proposal to identify locations for the implementation of photovoltaic solar energy production infrastructures in line with sustainability principles and for a subsequent assessment of the proposed projects. The analysis was carried out in two phases: the first with a multi-criteria analysis (MCA) in geographic information systems (GIS), in which a spatial index was developed to classify the Portuguese mainland territory according to its suitability as a sustainable location for utility-scale solar photovoltaic plants; and the second, with an *ex-ante* monitoring perspective, which identified the location of planned projects (plants licensed and waiting licensing with power capacity ≥ 1 MW) in relation to the obtained index. The approach constitutes a prototype of a system for spatial decision-making support for the territorial challenges of renewable energy production. We conclude that the location of future solar power plants was chosen primarily based on a technical and economic basis without considering the impact of these infrastructures on other aspects of sustainable development.

Recebido: 02/11/2023. Aceite: 01/12/2023. Publicado: 22/12/2023.

¹ Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Rua Branca Edmée Marques, 1600-276, Lisboa, Portugal. E-mail: andrejoelalves@edu.ulisboa.pt, eduarda.costa@campus.ul.pt, eduardoionas@campus.ul.pt.

² Laboratório Associado TERRA, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

³ Circular – Consultoria em Sustentabilidade. E-mail: samuel.niza@circular-cs.pt

Keywords: Energy geography; solar energy; energy transition; multicriteria analysis; GIS; mainland Portugal.

RESUMEN – OPTIMIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE PARQUES SOLARES DESDE UNA PERSPECTIVA DE SOSTENIBILIDAD. PROPUESTA DE ÍNDICE ESPACIAL. Uno de los principales desafíos a desarrollar centros de generación de energía renovable es la su localización. Esta decisión está intrínsecamente ligada a la necesidad de equilibrar la disponibilidad de recursos con otros usos. En el actual contexto de transición energética, la producción de energía renovable tendrá que crecer significativamente para descarbonizar el sistema eléctrico. En Portugal, los objetivos del Plan Nacional de Energía y Clima (PNEC) estipulan que la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en 2022 tiene que crecer ocho veces hasta el final de la década. Se prevén, por tanto, importantes transformaciones territoriales y cambios en los paisajes, con una creciente demanda de suelo que generará competición territorial e impactos sobre los ecosistemas. Este estudio presenta una propuesta de identificación de localizaciones para la implantación de infraestructuras de producción de energía solar fotovoltaica de acuerdo con los principios de sostenibilidad y la posterior evaluación de los proyectos propuestos. El análisis se llevó a cabo en dos fases: la primera, utilizando un análisis multicriterio (AMC) en sistemas de información geográfica (SIG) en el que se desarrolló un índice espacial que clasifica el territorio continental portugués en función de su aptitud como una localización sostenible para plantas solares fotovoltaicas; la segunda, en la que se identificó la localización de los proyectos previstos (plantas con licencia y en espera de licencia con potencia ≥ 1 MW) desde una perspectiva de monitorización *ex ante*, cruzando el índice obtenido. El enfoque adoptado es un prototipo de sistema espacial de apoyo a la toma de decisiones para los desafíos territoriales de la producción de energías renovables. La conclusión es que la localización de las futuras centrales solares se ha elegido predominantemente sobre la base de un razonamiento técnico-económico, sin considerar debidamente el impacto de estas infraestructuras en otras dimensiones del desarrollo sostenible.

Palavras chave: Geografia de la energía; energía solar; análisis multicriterio; SIG; transición energética; Portugal continental.

I. INTRODUÇÃO

A descarbonização dos sistemas energéticos, por via da transição para formas de produção de energia renovável, desempenha um papel fundamental para o desenvolvimento sustentável (Pan *et al.*, 2023). Nas últimas décadas, a transição energética tem sido promovida e orientada por políticas numa ótica de redução das emissões de gases com efeito de estufa (Jaforullah & King, 2014) e mitigação das alterações climáticas (Olabi & Abdelkareem, 2022). Esta transição global é considerada essencial para limitar as alterações climáticas de origem antropogénica (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022) a um aquecimento médio global inferior a 2°C até 2050 (Gardiner *et al.*, 2023).

Neste sentido, o aumento da produção de energia a partir de fontes renováveis revela-se um objetivo de política a diferentes escalas e promovido por vários atores de forma multisetorial. A nível global, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, promovidos pela Organização das Nações Unidas, constituem um dos quadros de referência comum para a integração nas políticas e regulamentações nacionais para uma crescente produção de energia limpa e garantia de acesso universal (Pan *et al.*, 2023). Anteriormente, o desafio de descarbonização e a promoção de transformações nos sistemas energéticos tinha sido impulsionada pelo Protocolo de Quioto (1997). Recentemente, em 2015, a ambição de sistemas energéticos de baixo carbono foi significativamente reiterada e os compromissos reforçados num conjunto de ações globais, como os Acordos de Paris (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2018), e posteriormente na COP22, em 2016, com um conjunto de restrições à geração de energia a carvão e gás e o comprometimento de cerca de duas centenas de países com a neutralidade carbónica nas próximas décadas (Ghezloun *et al.*, 2017).

A nível europeu, salientam-se diversos programas que refletem a transição energética numa perspetiva integrada das políticas climáticas e energéticas (Skjærseth, 2021). Desde a Diretiva Europeia para as Energias Renováveis (2018/2011/EU), que estabelece o enquadramento jurídico aplicável aos Estados-membros e que foi alvo de sucessivas revisões com o propósito de incrementar as metas de produção renovável, ao Pacto Verde Europeu (COM/2019/640), uma iniciativa de descarbonização estruturalmente transformadora das economias europeias (Wolf *et al.*, 2021), passando por estratégias e pacotes mais específicos, as políticas energéticas europeias têm-se pautado por um crescimento de ambição e abrangência.

Ultimamente, a invasão da Ucrânia, em 2022, gerou um aumento do preço dos produtos energéticos de origem fóssil no continente europeu (Osička & Černoč, 2022). A histórica relação de dependência energética da União Europeia (UE) face à Rússia (Dannreuther, 2016) levou à

reemergência da incorporação de renováveis no consumo de energia como uma questão vital para a segurança energética (Kuzemko *et al.*, 2022). A conjuntura de crise energética (Liu *et al.*, 2023) marcou uma alteração de postura das instituições políticas europeias com uma revisão em alta das principais metas, salientando-se a proposta de revisão da Diretiva Energias Renováveis, com o intuito de impulsionar a implementação de novos centros electroprodutores renováveis. Para acelerar ainda mais a concretização da transição energética, a Comissão Europeia propôs, em 2022, o programa *REPowerEU* (Vezzoni, 2023), com vista a reduzir rapidamente a dependência excessiva da UE em relação às importações russas de gás, petróleo e carvão. Associado ao *REPowerEU*, surgiu a Estratégia da UE para a Energia Solar que visa atingir os 320GW de potência instalada de energia solar fotovoltaica até 2025 (mais do dobro da capacidade instalada acumulada na UE até 2020) e quase 600 GW até 2030, prevendo-se que estas capacidades adicionais antecipadas substituam o consumo anual de 9 mil milhões de m³ de gás natural até 2027 (COM/2022/221).

Nesta sequência, é incontestável que a transição energética para as renováveis é, predominantemente, orientada por uma abordagem baseada em políticas (*policy-driven*), representando uma visão ancorada na sustentabilidade. No entanto, o progresso e inovação tecnológica em termos de eficiência de uso do solo podem ainda não ser suficientes para uma rápida descarbonização (Al-Mulali *et al.*, 2016; Fouquet, 2010). Por isso, a densidade de potência (W/m²) das energias renováveis é significativamente menor do que as fontes de energia fóssil (Nøland *et al.*, 2022). Esta diferença de magnitude leva a que o consumo de solo das infraestruturas renováveis seja superior, colocando importantes desafios à gestão territorial no contexto de transição energética.

Dado que a descarbonização do sistema energético gerará uma crescente procura por solo, competindo com outros usos e impactando ecossistemas, este estudo propõe o desenvolvimento de um modelo de localização com base nonexo território-energia. O seu propósito é a otimização da localização de parques solares numa perspetiva de sustentabilidade, garantindo maior coerência entre a organização espacial do sistema elétrico e o desenvolvimento territorial sustentável. Identificaram-se para este efeito, com base nas narrativas bibliográficas discutidas na secção teórica deste artigo, quatro pressupostos: (i) otimização do potencial de produção; (ii) minimização da transformação do território; (iii) proteção de áreas naturais e usos/ocupações do solo relevantes; e (iv) restrição à concentração espacial. Em termos metodológicos, numa primeira fase desenvolveu-se um índice espacial para classificar o território continental português num gradiente de acordo com a sustentabilidade para a implantação de parques solares. Numa segunda fase, o índice obtido foi utilizado numa perspetiva de monitorização *ex-ante* dos projetos planeados (≥ 1 MW).

O artigo organiza-se em seis secções. A primeira é a presente introdução, seguindo-se o enquadramento teórico e uma terceira secção com a apresentação da realidade nacional. A quarta secção corresponde à componente metodológica. Posteriormente, na quinta secção os resultados são sumarizados. Na sexta e última secção são discutidos os resultados à luz das suas implicações para o planeamento territorial, sendo rematados por breves parágrafos conclusivos.

II. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

A energia solar fotovoltaica é antecipada, de acordo com a *Internacional Renewable Energy Agency* ([IRENA], 2023), como a fonte que terá o maior crescimento previsto para os próximos anos e, por conseguinte, pode emergir como a principal origem de desafios e conflitos. Os conflitos que emergem da transição energética são variados e a ambição de acelerar esta mudança gera maior procura e pressão no território. Retirando da análise as questões extrativistas e de ciclo de vida (Granovsky-Larsen & Larreátegui Benavides, 2023), destacam-se os conflitos institucionais/políticos e de uso do solo relativos à materialização das infraestruturas no território (Farinós-Dasí, 2022; Koelman *et al.*, 2018, 2022). Os primeiros, decorrentes da insuficiente articulação dos diferentes níveis de gestão territorial e da deficiente integração do planeamento setorial da energia no ordenamento do território, agravam os segundos. São notórios exemplos na literatura de externalidades ao nível de alterações controversas no uso e ocupação do solo. Por exemplo, Hernandez *et al.* (2015) identificaram que no estado da Califórnia (Estados Unidos da América), cerca de 30% dos parques solares foram construídos em áreas de agricultura e pastagem. Além disso, os autores verificaram impactes nas proximidades a áreas protegidas. Poggi *et al.* (2018), numa análise ao município de Loures (Portugal), assinalaram alguns projetos solares e eólicos que levaram também à conversão de áreas agrícolas e florestais. Os autores sugerem a emergência de uma dicotomia funcional entre a preservação de solos

com forte potencial agrícola e a expansão da produção de energias renováveis nas áreas rurais. À escala global, a investigação de Rehbein *et al.* (2020) sugere que a extensão da sobreposição, atual e futura, de instalações de energias renováveis com áreas de conservação, irá comprometer objetivos de conservação da biodiversidade. Cole *et al.* (2022), num diagnóstico extensivo às alterações no uso do solo no Reino Unido, reportaram dinâmicas significativas de conversão de áreas agrícolas em infraestruturas de produção de energia renovável. Os autores estimam que 72% das áreas correspondentes a transição de agricultura para a classe “Indústria, comércio e equipamentos gerais” da carta CORINE *Land Cover* se deveram à implantação de parques solares. Barral *et al.* (2023) evidenciaram, numa análise às regiões do sul da Península Ibérica, que o crescimento da superfície ocupada por centrais solares levou a importantes transformações nas paisagens. Até 2020, os autores contabilizaram que, dos mais de 8 mil ha de área de parques solares, 77% tinha um aproveitamento agrícola anteriormente. Além disso, os potenciais impactes ambientais destas infraestruturas são abrangentes (Abbasi & Abbasi, 2012; Hernandez *et al.*, 2014), muitas vezes com prejuízos que extravasam a área de implantação (Niebuhr *et al.*, 2022).

Perante a corrida à neutralidade carbónica, é expectável que os padrões futuros de ocupação do solo com um crescimento significativo da área dedicada a parques solares, venha a intensificar alguns destes efeitos negativos na biodiversidade (Levin *et al.*, 2023). No entanto, a literatura científica também destaca exemplos de impactes positivos, co-benefícios (Blaydes *et al.*, 2021; Guoqing *et al.*, 2021) e oportunidades de compatibilização com outros usos e funções produtivas (Weselek *et al.*, 2019), sinalizando uma perspetiva mais otimista e até de coexistência benéfica resultante das implicações territoriais da produção de energia renovável.

Perante esta ambivalência relativamente ao tópico e numa tentativa de balancear diferentes interesses que se desenvolvem no espaço geográfico, torna-se imperativo conceber estratégias que assegurem padrões de localização coerentes com outros objetivos de planeamento, visando minimizar os impactes ambientais e maximizar os benefícios sociais. Também a avaliação de impactes e de políticas públicas, nas suas diferentes fases, ganham relevância. Isso só é possível com a melhor informação técnico-científica disponível. É neste campo que a modelação espacial em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) pode auxiliar com o desenvolvimento de sistemas espaciais de apoio à decisão, análise geográfica e indicadores de monitorização para garantir escolhas estratégicas de localização (Guaita-Pradas *et al.*, 2019; Zardo *et al.*, 2023).

A identificação de localizações para a produção de energia solar de modo a minimizar os impactes associados emerge como uma questão relevante no contexto de um planeamento territorial focado na sustentabilidade. Se o termo sustentabilidade tem sido considerado como indissociável da produção de energia renovável – utilizando-se, por vezes, a expressão “sistemas energéticos sustentáveis” como sinónimo a sistemas energéticos renováveis/baixo carbono –, assumindo que a descarbonização da produção de energia representava inequivocamente o percurso para a sustentabilidade (Kabeyi & Olanrewaju, 2022), tem surgido na literatura um conjunto de interpretações mais cuidadosas e complexas doravante dos impactes destes modos de produção e a necessidade de equilibrar perspetivas em conflito (Eichhorn *et al.*, 2019; Moore-O’Leary *et al.*, 2017; Valera *et al.*, 2022). A sustentabilidade enquanto conceito de políticas definido no relatório de Brundtland como aquele que “permite satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações satisfazerem as suas próprias necessidades” (World Commission on Environment and Development [WCED], 1987) não tem uma tradução territorial facilmente mensurável (Böhringer & Jochem, 2007). A sua definição requer a convergência de um conjunto de premissas e a literatura não é ainda consensual sobre os indicadores de base territorial indispensáveis a uma solução que compatibilize a produção de energia renovável com as dimensões económicas, ambientais e sociais da sustentabilidade.

No entanto, há um conjunto de elementos e características sob os quais existe concordância. Há um consenso alargado do potencial existente em áreas urbanizadas, degradadas e improdutivas (Hernandez *et al.*, 2019), com o objetivo de minimizar o consumo de solo e restringir a ocupação de áreas com elevada aptidão agrícola (Hermoso *et al.*, 2023). No campo da ecologia, é recomendada a ocupação de áreas caracterizadas por um baixo valor ecológico, de forma a priorizar a compatibilização com a preservação da biodiversidade (Cameron *et al.*, 2012). As áreas designadas como protegidas, de reserva e com classificação semelhante devem ser especialmente consideradas (Hernandez *et al.*, 2015). Além disso, destaca-se a importância de minimizar os impactes ecológicos cumulativos decorrentes da concentração espacial de infraestruturas (Moore-O’Leary *et al.*, 2017). Numa orientação mais técnica, e com o propósito de minimizar as transformações no território, é

crucial a proximidade das redes de transporte e distribuição de eletricidade, bem como a proximidade entre as áreas de produção e consumo (Hernandez *et al.*, 2015).

Contudo, como demonstrado por Stremke & Dobbelsteen (2013), este tipo de análises não se confinam a uma única escala, pelo que o tipo de abordagens e variáveis a considerar é influenciado pelo detalhe que se pretende. Além disso, diferentes atores e disciplinas têm conceções diferenciadas sobre o que constitui a sustentabilidade no contexto da produção de energia. Desta forma, encontram-se na literatura diferentes níveis de análise, variando desde estudos pormenorizados em que o conceito é definido de forma precisa e mensurável, até abordagens mais simplificadas numa conceção mais aberta e difusa.

III. O CONTEXTO PORTUGUÊS

A relevância do contexto português como caso de estudo é fundamentada em múltiplos aspetos. Em particular, quatro aspetos são elencados.

O primeiro resulta da aptidão do território e elevado potencial de produção de energia solar, que leva a que o país seja atrativo a investimentos para parques solares. O seu posicionamento no extremo sudoeste europeu, favorável a uma elevada irradiação solar (~1400-2000 kWh/m²/ano; Silva *et al.*, 2020), destaca Portugal como um dos países da UE com maior potencial de aproveitamento energético do sol (Perpiña Castillo *et al.*, 2016).

O segundo resulta de um “atraso” que o país apresenta em termos de capacidade solar instalada, significativamente inferior a outros países europeus em contextos climáticos menos propícios ao aproveitamento solar. Em Portugal, a trajetória de descarbonização do sistema elétrico tem sido alcançada maioritariamente por meio da produção hidroelétrica e eólica, que apresentavam, em 2022, respetivamente, uma capacidade instalada de 8,1 GW e 5,7 GW (fig. 1). Por sua vez, a potência instalada solar fotovoltaica foi de apenas 2,6 GW, dos quais 1,5 GW foram instalados após 2020. Apesar da localização geográfica privilegiada, Portugal ocupava, em 2022, apenas a 18^a posição em termos de capacidade solar instalada na UE-27 (EUROBSERV’ER, 2023). Neste sentido, não só persiste um vasto potencial de desenvolvimento ainda por explorar, como uma ambição de recuperar este atraso.

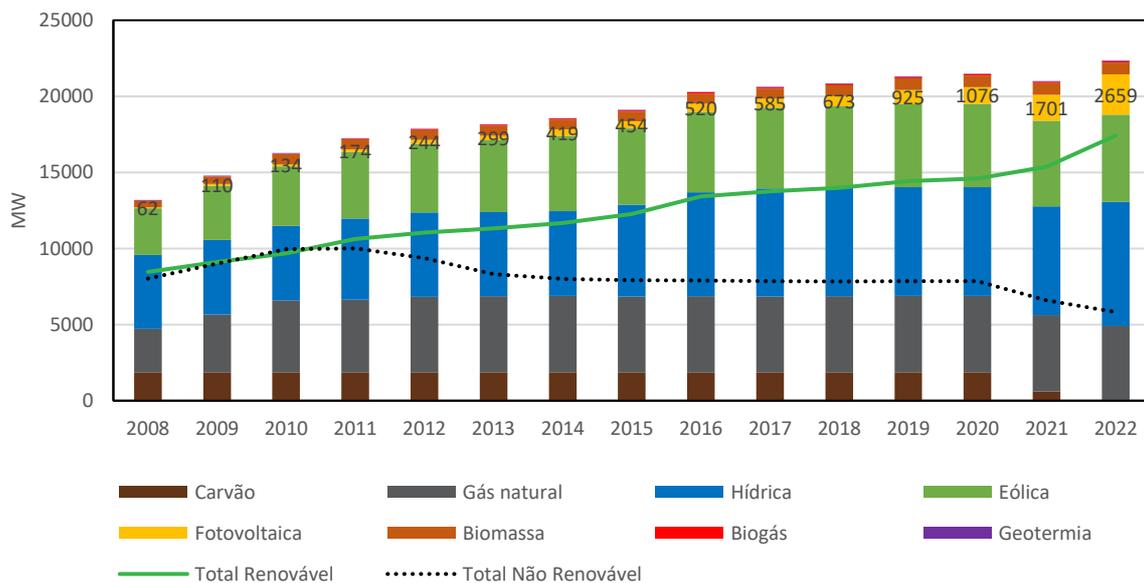


Fig. 1 – Potência instalada nas centrais produtoras de energia elétrica em Portugal (excluindo cogeração, tipologias de cogeração e hídrica em bombagem). Figura a cores disponível online.

Fig. 1 – Installed capacity of electricity generating plants in Portugal (excluding cogenerations and pumped hydro). Colour figure available online.

Fonte: DGEG (2023a)

O terceiro aspeto deriva da evolução das políticas energéticas e estratégias de descarbonização que se têm pautado por uma tendência de incremento significativo das metas de incorporação de

renováveis no consumo final bruto de energia e, como tal, ambiciosas visões para o aumento da capacidade instalada no país. Nos próximos anos a instalação de novos centros eletroprodutores renováveis tem de aumentar de forma consistente para alcançar as metas do Plano Nacional Energia e Clima (PNEC) e do Roteiro Nacional para a Neutralidade Carbónica (RNC). A revisão, em 2023, do PNEC aponta para 20,4 GW de solar fotovoltaica instalada (dos quais 14,9GW centralizado) até 2030 (fig. 2), levando a que a energia fotovoltaica se torne a tecnologia com maior potência instalada no país. Deste modo, a instalação de nova potência terá de crescer cerca de oito vezes face à existente. Assumindo uma intensidade de uso do solo das centrais solares fotovoltaicas centralizadas entre 2,5ha/MW e 7,5ha/MW – valores baseados na análise de Calvert e Mabee (2015) – é possível projetar a área potencialmente ocupada, em 2030, para os 14,9GW antecipados. Com base nestes extremos, podemos estimar que os requisitos de ocupação do solo sejam de 37-111 mil ha. Isto traduz-se em 0,4-1,3% da área de Portugal continental (excluindo os 5,5GW de solar descentralizado). Os resultados deste simples exercício estão em consonância com outras estimativas de maior complexidade. Por exemplo, van de Ven *et al.* (2021) calcularam que, no contexto europeu, com uma penetração solar estimada entre 25% e 80% da produção de eletricidade em 2050, a ocupação relativa do solo pelas infraestruturas associadas deverá situar-se entre 0,5% e 2,8% da área total da comunidade europeia. Desta forma, ressalta-se a complexidade de implementação da transição energética no território, dadas as rápidas transformações que se avizinhm.

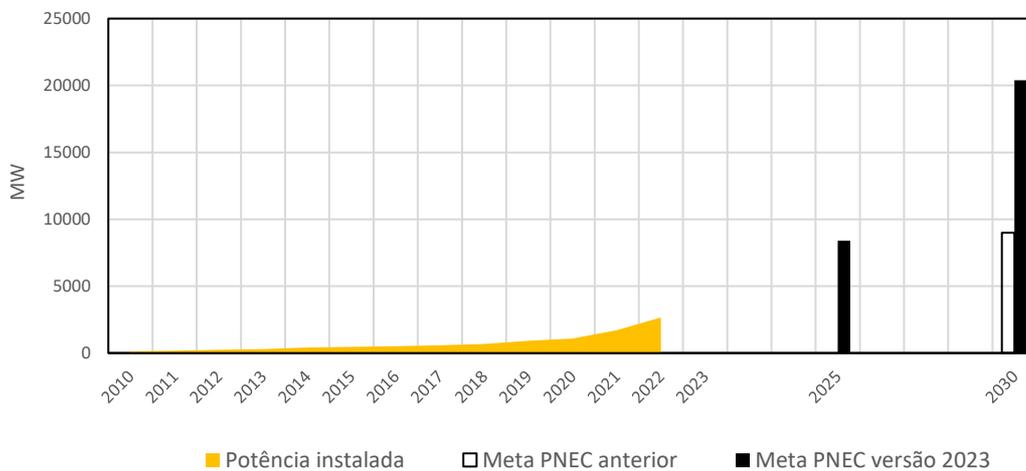


Fig. 2 – Evolução da potência fotovoltaica instalada e trajetória prevista. Figura a cores disponível online.

Fig. 2 – Evolution of installed photovoltaic capacity and expected trajectory. Colour figure available online.

Fonte: DGEG (2023b)

O quarto e último aspeto está relacionado com importantes alterações na legislação do setor energético e ambiental, sobretudo no que se refere à simplificação dos processos de licenciamento. Em consequência do *REPowerEU*, a Comissão Europeia incitou os Estados-membros a acelerar os procedimentos de concessão de licenças para projetos de energia renovável (CE/2022/3219). Em Portugal, isto traduziu-se numa série de alterações de desregulação nos processos de licenciamento, incluindo a criação de isenções a avaliação de impacto ambiental (Decreto-Lei n.º 30-A/2022, de 18 de abril; República Portuguesa, 2022a) e no controlo prévio de operações urbanísticas (Decreto-Lei n.º 72/2022, de 19 de outubro; República Portuguesa, 2022b) e até mesmo simplificação dos processos participativos (Simplex Ambiental: Decreto-Lei n.º 11/2023, de 10 de fevereiro; República Portuguesa, 2023). Estas mudanças têm o potencial de estimular a construção de novas infraestruturas por um lado, enquanto, por outro, levantam preocupações sobre a localização e a sua conformidade com regras de proteção ambiental. Ainda num esforço de assegurar que esta aceleração decorre numa implementação que não comprometa outros valores ambientais e territoriais, promoveu-se a identificação de “*go-to areas*”, ou seja, áreas de menor sensibilidade (ambiental e patrimonial) que se constituem como prioritárias a um processo de licenciamento mais simplificado para centros eletroprodutores do tipo solar e eólica (Simões *et al.*, 2023).

Esta conjugação de fatores torna Portugal um caso de estudo muito relevante face à temática. Antecipando-se uma tendência de expansão significativa do número e área de centros eletroprodutores renováveis que impactará diferentes dimensões do território, é de esperar que as

transformações territoriais para a concretização da transição energética constituir-se-ão provavelmente como elementos preponderantes na configuração de alterações no uso e ocupação do solo nos próximos anos.

IV. METODOLOGIA

A metodologia adotada compreendeu um conjunto de técnicas de análise espacial em SIG, juntamente com a integração de informação numa AMC.

1. Dados

A partir da literatura apresentada na secção introdutória, foram selecionadas nove variáveis (quadro I), combinando indicadores representativos das narrativas bibliográficas, considerados relevantes para a implantação de projetos de energia renovável.

Quadro I – Informação recolhida para a construção dos fatores de aptidão.

Table I – Information collected for the construction of suitability factors.

Dados (período)	Tipo	Fonte
Centrais solares (dezembro 2022)	Vetorial (pontos e polígonos)	Direção-Geral de Energia e Geologia
Centrais hídrica (dezembro 2022)	Vetorial (pontos)	Direção-Geral de Energia e Geologia
Centrais eólicas (dezembro 2022)	Vetorial (pontos)	Direção-Geral de Energia e Geologia
Áreas urbanas da Carta de Uso e Ocupação do Solo (2018)	Vetorial (polígonos)	Direção-Geral do Território
Serviços de ecossistema do uso e ocupação do solo (2018)	Matricial	Cabral <i>et al.</i> (2021)
Modelo digital de terreno (2011)	Matricial	Copernicus – EU DEM
Rede NATURA 2000 (2023)	Vetorial (polígonos)	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
Rede Nacional de Áreas Protegidas - RNAP (2023)	Vetorial (polígonos)	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
Linhas da rede de transporte de eletricidade de média, alta e muito alta tensão (2023)	Imagem não georreferenciada	Redes Energéticas Nacionais

Estas variáveis foram transformadas em sete fatores de aptidão, ou seja, indicadores quantitativos (normalizados linearmente para a escala 0-100) que classificam as unidades de análise pela sua aptidão: (i) distância a centros eletroprodutores (solar, hídrica e eólica); (ii) distância a áreas urbanas; (iii) adequação do declive; (iv) distância à rede de transporte de eletricidade; (v) distância a áreas ecologicamente sensíveis; (vi) valor de serviços de ecossistema do uso e ocupação do solo; e (vii) potencial de produção de energia fotovoltaica.

4.1.1 Distância a centros electroprodutores (solar, hídrica e eólica)

Os dados geográficos correspondentes às unidades de produção de eletricidade renovável foram obtidos a partir da Direção Geral de Energia e Geologia (<https://www.dgeg.gov.pt/pt/servicos-online/informacao-geografica/energia/energia-eletrica/>). A informação sobre as centrais solares fotovoltaicas foi validada por fotointerpretação, e classificada como “em operação” ou “prevista”. A análise com recurso a imagens de satélite *Sentinel-2*, de dezembro de 2022, permitiu identificar 192 polígonos correspondentes a 110 números de processo de centrais solares previstas (licenciadas ou a aguardar licenciamento). As infraestruturas eólicas e hidroelétricas, disponibilizadas apenas em formato pontual, foram delimitadas de forma a abranger a sua área de implantação à semelhança da abordagem de Simões *et al.*, (2023). A metodologia adotou um raio de 120 metros em torno das unidades eólicas, o que equivale a 1,5 vezes o diâmetro médio das pás (que, em Portugal, possui uma média de 80 metros de diâmetro), bem como um raio de 50 metros ao redor das centrais hidroelétricas, com o intuito de abranger unicamente a infraestrutura, excluindo a área da albufeira (Simões *et al.*, 2023).

Este fator é relevante para a análise da geografia de produção de energia renovável visto que a concentração espacial de infraestruturas renováveis está associada a impactes cumulativos (Moore-O’Leary *et al.*, 2017) e à capacidade de carga dos ecossistemas, sendo um dos fatores impulsionadores de movimentos locais de oposição (Kontogianni *et al.*, 2014).

O escalonamento deste indicador considerou aptidão nula até uma distância de 2km entre centros electroprodutores (o referencial de 2km surge no Decreto-Lei n.º 11/2023 de 10 de fevereiro como um dos critérios para a isenção de alguns procedimentos de avaliação de impacte ambiental), crescendo de forma linear a partir deste limiar até ao máximo de distância. As centrais em operação (n=196 polígonos, Σ 2828ha) foram utilizadas para o indicador, enquanto as centrais previstas (n=192 polígonos, Σ 6843ha) foram excluídas da análise atual, sendo reservadas para a monitorização subsequente.

4.1.2 *Distância a áreas urbanas*

A proximidade das infraestruturas de produção às áreas de consumo constitui uma mais-valia na distribuição e consumo de eletricidade minimizando perdas na transmissão e menor necessidade de transformações territoriais no desenvolvimento da rede (Aly *et al.*, 2017). Porém, a proximidade excessiva a áreas urbanas pode gerar externalidades, tais como a desvalorização no preço do solo (Elmallah *et al.*, 2023), impactes visuais na paisagem (Ioannidis & Koutsoyiannis, 2020) e competição com outros usos e funções.

Os polígonos de áreas urbanas foram extraídos da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) de 2018 produzida pela Direção-Geral do Território (DGT). Tendo em conta as classes de “Territórios artificializados” da COS 2018, excluíram-se instalações agrícolas, parques e jardins, assim como infraestruturas viárias e ferroviárias. No caso das duas primeiras por não serem áreas de elevado consumo de eletricidade, enquanto no segundo porque levariam a uma sobrestimação da proximidade a aglomerações urbanas. Face à unidade mínima cartográfica de 1ha da COS (DGT, 2019), apenas polígonos com dimensão igual ou superior são identificados estando excluídos perímetros de áreas urbanas com dimensão inferior a esse limiar.

A normalização desta variável foi realizada considerando maior aptidão em áreas próximas às áreas urbanas, exceto numa faixa imediata de 2km (distância a partir da qual a área de influência visual dos parques solares deixa de ser elevada (Diego *et al.*, 2022) ao redor dos polígonos urbanos onde a aptidão foi definida como 0, decrescendo à medida que a distância aumenta até ao seu máximo (12km).

4.1.3 *Adequação do declive*

Os aspetos topográficos assumem um papel crucial na alocação do espaço necessário para a produção de energia fotovoltaica (Aly *et al.*, 2017). Áreas aplanadas são um requisito que não só reduz a ocorrência de sombreamentos como permite conter custos infraestruturais devido ao risco de erosão e instabilidade de vertentes. No entanto, na literatura não existe concordância sobre um valor ideal. Enquanto algumas abordagens mais conservadoras consideram um declive superior a 5% como restritivo (Cameron *et al.*, 2012), a IRENA propôs um limite máximo de 45° (IRENA, 2014). Neste contexto, esta proposta metodológica estabeleceu um limiar de 20°. No entanto, contrastando com a generalidade dos estudos, que impõem limites baixos como restrição, a nossa proposta metodológica assume um gradiente decrescente. Assim, a aptidão é máxima em áreas planas (com declive de 0°) e diminui linearmente até atingir 20°, a partir do qual a aptidão é nula.

4.1.4 *Distância à rede de transporte de eletricidade*

A distribuição de eletricidade desempenha um papel crucial na cadeia de fornecimento de energia elétrica, situando-se como uma etapa intermédia entre a produção e o consumo. A distância entre os pontos de geração e consumo relaciona-se com perdas de energia no transporte e implica transformações territoriais para garantir uma transmissão adequada. No contexto europeu, as expansões das redes de infraestruturas de transporte de eletricidade têm sido catalisadores de conflitos pelos impactes na paisagem e alterações no uso do solo (Dunlap, 2023). De forma a minimizar as transformações territoriais, é preferível que novos centros eletroprodutores se localizem o mais próximos possível de linhas da rede com capacidade. Por questões de disponibilidade de informação (<https://datahub.ren.pt/pt/redes/>) utilizaram-se apenas as linhas elétricas de média, alta e muito alta tensão. Neste contexto, considerou-se aptidão máxima (100) a mínima distância à rede e aptidão mínima (0) ao máximo de distância (55 km).

4.1.5 *Distância a áreas ecologicamente sensíveis*

Os impactes ambientais da produção de energia renovável representam o antagonismo de uma estratégia de descarbonização em prol da sustentabilidade. A literatura aponta para impactes da produção solar centralizada em áreas protegidas e nas suas proximidades (Hernandez *et al.*, 2015). A implantação de um parque solar terá um impacto ambiental mais significativo ao ser instalado numa área de preservação natural. Considerando as áreas da rede NATURA 2000 e da Rede Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) como ecologicamente sensíveis, determinou-se aptidão nula no perímetro destas áreas. Além disso, de forma a considerar a sua envolvimento numa perspectiva descrente de aptidão optou-se pela utilização de distâncias, pelo que a aptidão cresce linearmente até 100 ao máximo de distância a estas áreas (30 km).

4.1.6 *Valor de serviços de ecossistema do uso e ocupação do solo*

As alterações de uso e ocupação do solo provocadas pela transição energética são uma das principais consequências diretas da sua implementação. Assumir que se pode discriminar o tipo de uso/ocupação que pode ser convertido ou que devem ser conservados numa perspetiva discreta é um exercício relativo. Análises que se baseiam na distinção entre alterações controversas ou não controversas (Kiesecker *et al.*, 2020; Simões *et al.*, 2023) podem ser interpretadas como cientificamente subjetivas. Neste sentido, ao invés de dicotomias, é preferível uma classificação assente num gradiente quantitativo. Desde análises económicas com base na rentabilidade (Havrysh *et al.*, 2022) até abordagens mais complexas custo-benefício, relacionando ecossistemas-alimentação-energia (Kim *et al.*, 2022), é possível associar a cada classe um valor quantitativo que pode ser escalonado para um valor de aptidão. Para associar um valor de aptidão a cada classe de uso e ocupação do solo em linha com princípios de sustentabilidade, optou-se por uma abordagem baseada em serviços de ecossistema. Utilizou-se o valor de serviços de ecossistema através do índice Assessment of Ecosystem Services and Biodiversity in Portugal (ASEBIO) desenvolvido por Cabral *et al.* (2021), que tem como base as classes da *CORINE Land Cover*. Criou-se um indicador composto pela média aritmética dos oito serviços de ecossistema determinados pelos autores: regulação climática, purificação da água, qualidade de *habitat*, regulação da seca, recreação, fornecimento de alimentos, prevenção da erosão e, por fim, polinização. Valores mais elevados de serviços de ecossistema, ou seja, áreas com um potencial elevado de fornecer serviços ecossistémicos, foram convertidos numa aptidão baixa, associando, assim, a sustentabilidade dos parques solares às modificações no uso do solo em ecossistemas de menor valor.

4.1.7 *Potencial de produção de energia fotovoltaica*

A incidência de radiação solar é o principal fator de viabilidade de um projeto de exploração de energia solar. Para esta análise, utilizou-se a informação do *Global Solar Atlas* (<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/portugal>) correspondente ao potencial de produção de energia solar fotovoltaica (1994-2018). Este indicador, calculado a partir dos algoritmos *Solar GIS Data*, representam espacialmente o potencial teórico de produção de eletricidade fotovoltaica anual assumindo uma inclinação ótima dos módulos. Valores mais elevados foram interpretados como indicativos de aptidão máxima, com uma diminuição linear correspondente.

5. Métodos

A abordagem metodológica em SIG decorreu em diferentes fases (fig. 3). Recorreu-se a um conjunto de técnicas de análise espacial para a preparação da informação. O tratamento da informação e transformação em fatores de aptidão decorreu pelo cálculo de distâncias euclidianas e normalização da informação numa escala comum (0-100) por via de funções lineares. A transformação recorrendo a algoritmos lineares é a abordagem mais comum em AMC (Ozturk & Batuk, 2011) e, neste caso, quanto maior o valor, maior a aptidão. Posteriormente foi realizada uma análise de multicolinearidade dos fatores de aptidão recorrendo ao fator de inflação da variância (VIF), de forma a despistar potenciais redundâncias nos dados.

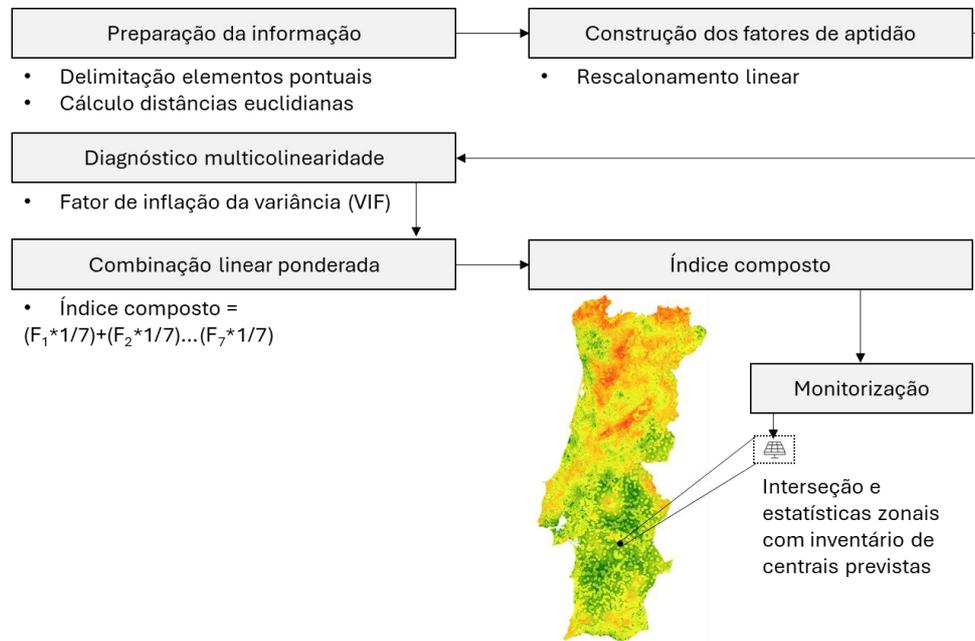


Fig. 3 – Abordagem metodológica. Figura a cores disponível online.

Fig. 3 – Methodological approach. Colour figure available online.

Posteriormente, a integração dos fatores de aptidão num índice composto decorreu por via de uma combinação linear ponderada (CLP). A integração SIG-AMC responde essencialmente a problemas de decisão espacial que envolvem normalmente um grande conjunto de alternativas viáveis e critérios de avaliação múltiplos, contraditórios e incomensuráveis (Malczewski, 2006). Na AMC, as variáveis são assumidas como uma condição que se pretende avaliar e influenciam a tomada de decisão, existindo fatores de aptidão e critérios de exclusão. Os fatores, por via de atribuição de pesos e importâncias diferenciadas, permitem avaliar um gradiente de aptidão, enquanto os critérios de exclusão são entendidos como restrições que limitam as alternativas em consideração. Este tipo de abordagem SIG-AMC tem sido aplicado a diferentes tipos de energia renovável (Aly *et al.*, 2017; Janke, 2010; Moradi *et al.*, 2020), permitindo identificar soluções quantificadas para apoio à decisão.

Todos os fatores foram considerados com igual grau de importância na composição do índice através de CLP, assumindo uma abordagem abrangente e holística. A utilização de diferentes ponderações, neste contexto, carece de apoio bibliográfico e revela-se complexa, especialmente pela dificuldade em isolar dimensões específicas, como a económica, ambiental e social, uma vez que cada fator pode abranger questões que transcendem uma única dimensão. Não se consideraram critérios de exclusão, já que o objetivo do índice composto não é resultar em localizações específicas nem restringir soluções, mas sim de explorar a existência de um gradiente em Portugal continental mais ou menos sustentável. Todo o processamento analítico decorreu em formato matricial com uma resolução de 100 m no sistema de referência recomendado para Portugal continental (PT-TM06/ETRS89).

Por fim, o resultado obtido foi cruzado com o inventário de centrais solares futuras para a componente de monitorização. A interseção permitiu contabilizar a correspondência entre os locais onde se espera a implantação dos centros electroprodutores e as áreas com os diferentes níveis do índice. Além disso, extraiu-se, para um conjunto de projetos (os dez maiores em área por número de processo), estatísticas zonais correspondentes à média dos vários fatores de aptidão.

V. RESULTADOS

A integração dos vários fatores considerados (fig. 4) permitiu obter um gradiente que classifica o território nacional de acordo com o potencial de implantação de centrais solares fotovoltaicas em linha com princípios de sustentabilidade (fig. 5).

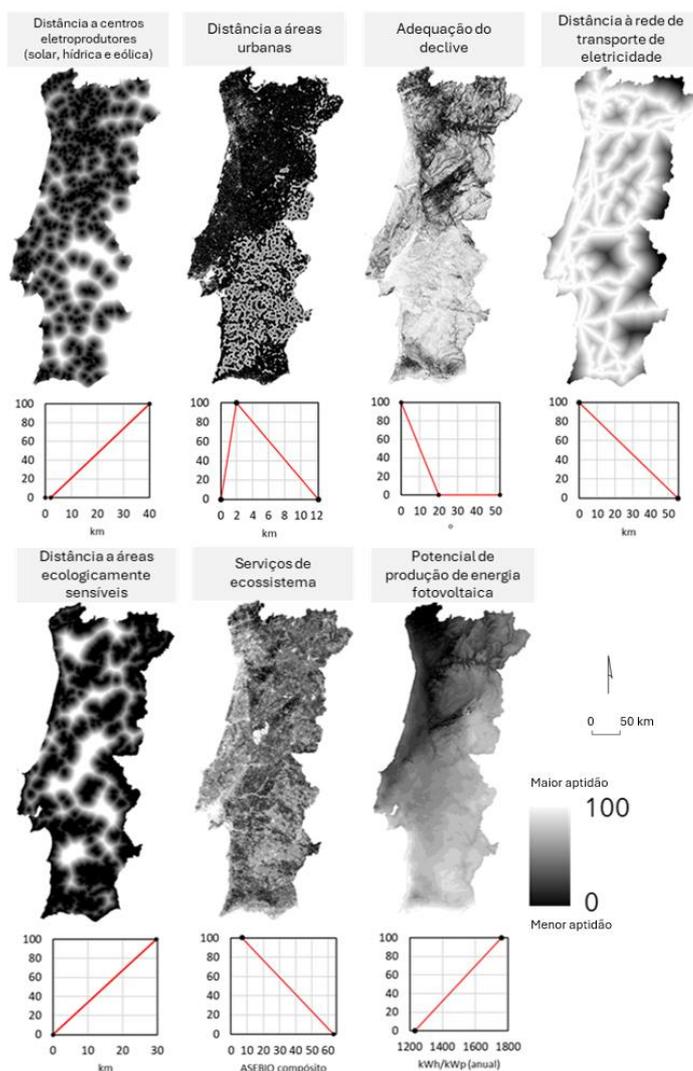


Fig. 4 – Fatores de aptidão energética.

Fig. 4 – Suitability energy criteria.

Importa salientar que a correlação entre os fatores é mínima, pelo que se verifica ausência de multicolinearidade no modelo (quadro II). A distribuição espacial do índice (fig. 5) apresenta valores mais elevados no sul do país, onde se encontra prevista uma porção significativa dos projetos programados. A partir da figura 4 compreende-se que nesta área de Portugal continental a aptidão física do território (radiação solar elevada e topografia aplanada), condições técnicas (elevada densidade da rede de transporte de eletricidade) e outros dos restantes fatores conjugam-se numa situação próxima de ótima. No entanto, o valor máximo do índice é de 82,63, o que indica que não ocorre uma sobreposição total das condições ótimas nos diversos fatores, na medida em que a proximidade de áreas ecologicamente sensíveis e ecossistemas importantes, como o montado, afeta negativamente a elevada aptidão apresentada na generalidade dos fatores em algumas áreas do Alentejo. Apesar disso, é possível identificar áreas com elevado *score* em praticamente todas as regiões do território continental. Neste sentido, a valência do território para a produção de energia solar permite uma distribuição geograficamente mais equilibrada para a descarbonização da produção de eletricidade.

Num exercício exploratório das áreas com maior potencial de sustentabilidade (índice ≥ 70 , correspondendo à metade superior do 10.^o decil) e pelo menos 100ha contíguos identificaram-se cerca de 34 mil ha (0,38 % de Portugal continental). Se considerarmos uma estratégia mais descentralizada, com a promoção de centrais de menor dimensão, com o critério de 50ha contíguos, a área disponível aproxima-se dos 40 mil ha. Estes valores são à partida, suficientes para cobrir os projetos licenciados e em processo de licenciamento (cerca de 6800ha) de centrais solares fotovoltaicas com potência \geq

1MW. Não obstante, tal extensão territorial revela-se insuficiente para responder às metas de 2030 unicamente pela produção centralizada, o que implica a necessidade de instalação de centros eletroprodutores em locais com tendência para conflitos com os princípios de sustentabilidade.

Quadro II – Estatísticas de multicolinearidade.

Table II – Multicollinearity statistics.

Fator	Fator de inflação da variância (VIF)
Distância a centros eletroprodutores (solar, hídrica e eólica)	1,303
Distância a áreas urbanas	1,394
Adequação do declive	1,315
Distância à rede de transporte de eletricidade	1,169
Distância a áreas ecologicamente sensíveis	1,202
Valor de serviços de ecossistema do uso e ocupação do solo	1,209
Potencial de produção de energia fotovoltaica	1,434

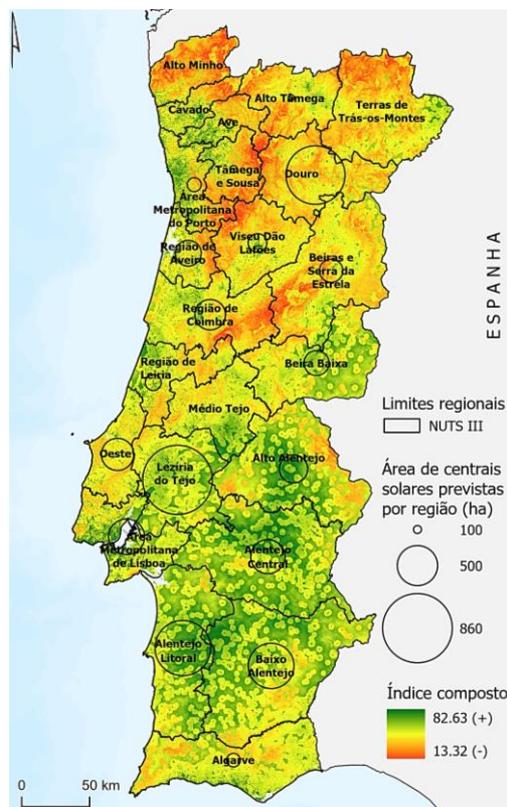


Fig. 5 – Índice composto e área total (ha) de centrais solares fotovoltaicas previstas. Figura a cores disponível online.

Fig. 5 – Composite index and total surface (ha) of the projected photovoltaic solar power plants. Colour figure available online.

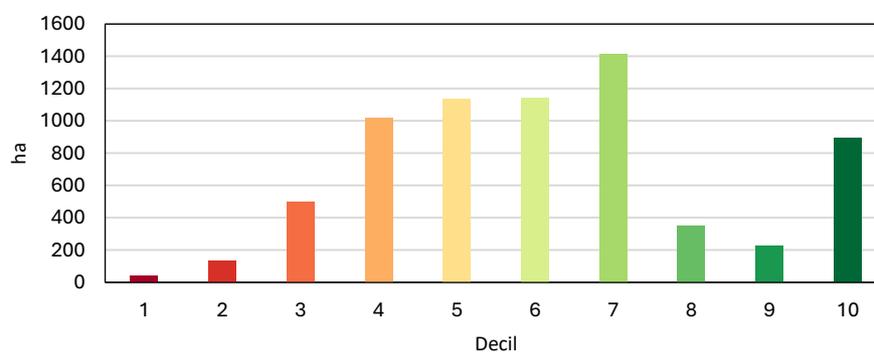


Fig. 6 – Relação do total de centrais previstas (em ha) com o índice composto (por decil).

Fig. 6 – Relation of the total of planned power stations (in ha) with the composite index (by decil).

Neste contexto, observam-se já potenciais desconformidades entre o potencial avaliado pelo índice e a realidade, uma vez que a distribuição dos projetos planeados indica que uma parte significativa dos projetos se sobrepõe com baixos valores do índice (fig. 6). Por sua vez, verifica-se uma reduzida sobreposição dos projetos com territórios com o índice nos decis 8 e 9, pelo que se pode afirmar que existe potencialidade para explorar localizações mais sustentáveis. A análise da figura permite compreender que as regiões Centro e Norte serão as que terão maiores desafios na territorialização da energia solar de acordo com os parâmetros considerados, já que apresentam, em geral, menor aptidão.

Numa análise mais detalhada, é possível compreender os fatores subjacentes aos resultados obtidos. Considerando os dez maiores projetos planeados (quadro III) de acordo com os dados da DGEG, que correspondem a aproximadamente 50% do total da área prevista, torna-se evidente que a localização destes parques solares depende, predominantemente, de critérios técnico-económicos. Isso é notório, sobretudo, devido à elevada aptidão em termos de potencial de produção de energia, proximidade às redes de transporte de eletricidade e adequação do relevo (conforme ilustrado na fig. 7).

Quadro III – Estatística por dimensão (ha) das centrais solares previstas.

Table III – Descriptive statistics on the size (ha) of planned solar plants.

Estadística	Todos os polígonos	10 maiores (por número de processo)
Mínimo	1,5	157
Média	62	307
Máximo	620	620
Desvio-padrão	920	132
Total	6843	3375

Fonte: DGEG

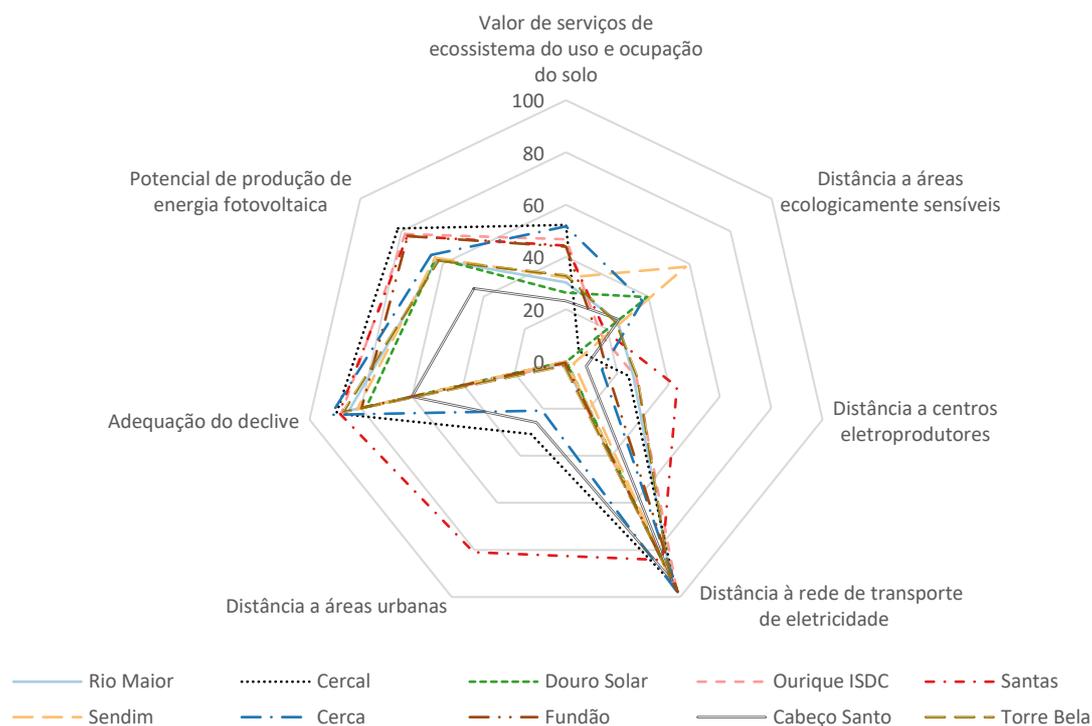


Fig. 7 – Análise dos fatores de aptidão para os dez maiores projetos de centrais solares previstas. Figura a cores disponível online.

Fig. 7 – Analysis of the suitability factors for the ten largest planned solar power plants. Colour figure available online.

A proximidade às áreas urbanas também parece ser um fator relevante para os promotores, uma vez que alguns dos projetos analisados apresentam uma pontuação mais baixa devido à sua excessiva proximidade a aglomerações urbanas, com distâncias inferiores a 2km. Por outro lado, os serviços de ecossistema associados às classes de uso e ocupação do solo e a distância a áreas ecologicamente sensíveis constituem alguns dos exemplos em que estes projetos apresentam *scores* muito baixos. Da mesma forma, é evidente uma tendência para a concentração espacial dos parques solares relativamente aos centros electroprodutores existentes, o que se traduziu numa baixa aptidão.

Em síntese, os resultados evidenciam um paradoxo relevante. Embora se constate o potencial, em termos de extensão territorial, para que novos projetos adotem critérios de localização mais coerentes com princípios de sustentabilidade, observa-se a predominância de uma lógica de decisão orientada por fatores técnico-económicos. Isto ocorre mesmo quando se verifica uma parcial correspondência entre as regiões com maior aptidão no índice e as regiões nas quais estão previstas superiores afetações de território para produção fotovoltaica. Esta dualidade de resultados constitui uma base sólida para a discussão de como as estratégias e políticas de implementação de parques solares em Portugal requerem uma dimensão territorial, alinhando-se os objetivos de descarbonização do país com o uso do solo.

VI. DISCUSSÃO

Os parques solares desempenharão um papel fundamental na transição para um sistema de eletricidade com menores emissões de carbono. No entanto, apesar do contexto favorável das políticas energéticas para a expansão destes centros electroprodutores, a sua natureza intensiva em termos de ocupação territorial implica potenciais conflitos de localização.

Este estudo apresentou uma proposta de modelo de apoio à decisão que também revelou algumas das implicações territoriais da descarbonização do sistema elétrico, demonstrando que o equilíbrio de perspetivas concorrentes sobre o uso do solo beneficia da utilização de abordagens de modelação espacial. O potencial de implementação das áreas que cumprem um conjunto de parâmetros para uma transição energética sustentável foi cartografado utilizando uma AMC. Apesar da adoção de metodologias de AMC aplicadas ao desenvolvimento de energias renováveis estar tradicionalmente associado ao planeamento energético orientado para a racionalização e maximização do potencial de produção, existe uma significativa capacidade para a avaliação de sustentabilidade (Bączkiewicz *et al.*, 2021; Cinelli *et al.*, 2014).

O índice composto demonstrou à escala do território continental português um potencial assimétrico para a implantação de parques solares num contexto de desenvolvimento sustentável. Verificou-se também que a localização das centrais previstas nem sempre era espacialmente coincidente com as áreas classificadas com maior aptidão, exibindo conflitos com algumas das dimensões consideradas. Particularmente, inferiu-se que o padrão de localização dos maiores projetos foi principalmente orientado por considerações técnicas e económicas. As dimensões ambientais têm sido menos relevantes na seleção das áreas de implantação. Evidenciou-se uma crescente tendência de concentração espacial dos futuros centros electroprodutores, possivelmente pelo interesse em beneficiar de economias de aglomeração associados à proximidade a infraestruturas da rede elétrica. Assim, a implementação das centrais previstas parece revelar um paradigma de racionalização e otimização que está a considerar, em menor grau, outros elementos relevantes do território.

1. Implicações para o planeamento

Dado este diagnóstico, é crucial considerar uma revisão das políticas para uma transição energética que se materialize numa ocupação sustentável do território. Em Portugal, as estratégias como o PNEC e o RNC, e outras indiretamente relacionadas com a energia (e.g., Plano de Ação para a Economia Circular, Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas, etc.), constituem referenciais setoriais sem uma visão espacialmente explícita. Embora muitos dos seus desígnios estejam representados nos instrumentos de ordenamento do território, não existe uma visão territorial para a transição energética, considerando diferentes fontes, tecnologias e valências dos territórios.

Uma proposta de territorialização da produção de energia renovável emergiu a partir do estudo de Simões *et al.* (2023). Os autores identificaram áreas de menor sensibilidade ambiental para a

implementação de centros electroprodutores solares e eólicos onde os procedimentos de licenciamento ambiental poderiam decorrer de forma simplificada. Esta proposta surge na sequência da recomendação da Comissão Europeia para a identificação das “*go-to areas*” (Joint Research Centre, 2022). Uma versão revista desta proposta está presente no Relatório de Estado de Ordenamento do Território de 2022 (DGT, 2023). Contudo, até ao momento, esta identificação não se materializou num enquadramento legal pelo que a proposta não tem, à data de redação deste artigo, validade normativa.

Além disto, este estudo assentou num conjunto de premissas desprovidas de suporte teórico quando aplicadas ao contexto português, especialmente devido às condicionantes do uso e ocupação do solo numa classificação dicotómica e simplista. Não obstante, constitui um importante marco para uma consciência da necessidade de planear de forma eficiente e estruturada a implementação das políticas energéticas no território.

A presente proposta de índice espacial não tem a intenção de substituir a análise anterior, uma vez que é menos abrangente em termos de dados. Porém, oferece uma perspetiva baseada em dados contínuos (fatores unicamente quantitativos), e, portanto, o resultado baseado em gradiente, em vez de dicotomias, permite a análise e monitorização prévia dos futuros centros electroprodutores com base num *score*. Consideramos que esta é a principal inovação desta análise, pois ajuda a compreender, de certa forma, os fatores de localização que justificam os padrões das futuras paisagens de geração de energia fotovoltaica.

Independentemente da metodologia, a identificação de áreas que possam traduzir-se na territorialização das políticas de energia e clima deve ser integrada nos instrumentos do sistema de gestão territorial, em particular naqueles que procedem explicitamente ao zonamento do uso do solo.

2. Recomendações para ação

A eficácia da conciliação das dimensões energia e território estará dependente de mudanças paradigmáticas nos instrumentos de política. A tendência de planeamento estratégico setorial tem aumentado o número de estratégias, políticas e iniciativas, sem que isso signifique uma direta integração e coerência.

Para uma crescente integração das políticas de energia com o uso do solo, e considerando a recente reforma de flexibilização dos processos de licenciamento, parece-nos relevante repensar alguns aspetos. Ascensão *et al.* (2023) estimaram na Península Ibérica cerca de 8700km² com elevado valor de biodiversidade e cujo atual enquadramento legal não previne a instalação de centros electroprodutores fotovoltaicos. Assim, considera-se relevante repensar as condicionantes ambientais e patrimoniais em vigor. Isto será importante para minimizar os impactes nos serviços de ecossistemas.

Noutra perspetiva, há que repensar o quadro normativo de forma a tirar partido das potenciais sinergias, favorecendo licenciamentos em áreas improdutivas, degradadas e com baixo valor ecológico (Hernandez *et al.*, 2019). A integração de vários atores neste processo será determinante para que se reformule a relação da produção de energia com o território.

3. Limitações

O propósito deste estudo não é a procura por respostas absolutas ou soluções definitivas, mas sim explorar e propor opções que visem a implementação da transição energética partindo de uma contextualização geográfica alinhada com o desenvolvimento sustentável. Identificam-se, de seguida, algumas limitações no quadro metodológico que devem ser consideradas em investigações futuras, mas principalmente na interpretação dos resultados para evitar extrapolações incorretas.

Em primeiro lugar, todos os fatores de aptidão tiveram uma contribuição igualitária para o índice final. Embora esta decisão se tenha baseado na premissa de evitar um viés injustificado que favorecesse alguns elementos em detrimento de outros, refletindo um compromisso com a objetividade na avaliação, é relevante reconhecer que não há uma garantia irrefutável de que essa seja a abordagem mais apropriada. Há fatores que podem ser mais importantes face a outros, mas a escolha de ponderações necessita de uma base fundamentada. Neste sentido, os resultados podem alterar-se consoante as assunções nos quais o modelo se baseia, nomeadamente a influência associada a cada fator.

Relativamente à informação geográfica utilizada, a seleção e utilização de determinados indicadores decorreu de um compromisso entre a conveniência da informação disponível e o potencial

enriquecimento do modelo. Salientam-se neste campo quatro aspetos que constroem a interpretação dos resultados. O primeiro é o caso do valor dos serviços de ecossistema. Já anteriormente se justificou a escolha por uma variável contínua, porém este indicador não foi concebido particularmente para questões de produção de energia renovável, pelo que necessariamente os impactos gerados pela implantação de parques solares não resultará em consequências negativas iguais em todas as tipologias de serviços de ecossistemas. Neste sentido, destaca-se a emergência da discussão referente à multifuncionalidade de parques solares e potenciais benefícios para a polinização (Dolezal *et al.*, 2021; Semeraro *et al.*, 2018). O segundo aspeto é uma característica técnica. Assumiu-se a partir da distância à rede de transporte de eletricidade que existe capacidade do operador em injetar e transportar novos volumes de eletricidade, o que pode, em algumas situações, não ser tecnicamente viável. A terceira limitação dos dados resulta da não utilização de áreas de reserva, como a Reserva Agrícola Nacional (RAN) e Reserva Ecológica Nacional (REN). A indisponibilidade desta informação para a totalidade dos municípios de Portugal continental à data de aplicação da metodologia resultou na sua não inclusão no modelo. Porém, estas áreas de reserva constituem também ecossistemas sensíveis que devem ser considerados na implementação de grandes infraestruturas solares. Efetivamente, a RAN e algumas tipologias da REN apresentam limitações regulamentadas na lei à instalação de centros eletroprodutores. Por fim, o quarto aspeto resulta de se ter assumido um potencial elevado máximo nas áreas urbanas. Na realidade o potencial das áreas urbanizadas depende fortemente do contexto local do tecido construído. Estratégias de produção descentralizadas serão mais exequíveis na impossibilidade de alocar o espaço necessário para uma produção em larga escala.

Termina-se esta secção alertando que a conceção de sustentabilidade nos processos de implementação da transição energética revela-se distintamente complexa, variando conforme a escala de análise (Picchi *et al.*, 2023). Este estudo propôs uma abordagem para os parques solares tradicionais de aplicação à escala nacional e regional com possível aplicação a outros territórios. A abordagem adotada penaliza a instalação em áreas aquáticas próximas a centrais hidroelétricas, embora o inventário utilizado não incluisse projetos desta tipologia. É importante esclarecer que normalmente este tipo de projetos têm uma área muito reduzida. Dado que o índice de sustentabilidade foi pensado numa ótica de grandes infraestruturas, não é o instrumento ideal para estes casos específicos. De modo similar, é relevante salientar que o índice não favorece estratégias de hibridização, como o desenvolvimento de parques híbridos eólica-solar a partir de parques eólicos já existentes. Portanto, pode inferir-se que, apesar dos resultados refletirem variações no índice de sustentabilidade em termos de localização, este critério singular não se mostra suficiente para estabelecer a validação das práticas de implementação como eficazes ou inadequadas.

Não obstante a necessidade de inclusão de mais fatores, especialmente para abranger mais elementos associados à sustentabilidade e lidar com questões específicas que vão além dos parques solares tradicionais, é importante frisar que esta proposta de índice espacial pode não ter uma tradução direta à escala local. Por isso, pressupõe-se que mesmo em localizações com aptidão elevada, não existe garantia de conformidade de implementação com os instrumentos de gestão territorial de nível municipal. Além disso, um índice elevado não isenta a necessidade de adotar planos integrados na paisagem e de respeitar processos participativos envolvendo as comunidades locais e ativar mecanismos de compensação para lidar com os impactos gerados.

4. Pistas para investigações futuras

Para além das limitações identificadas, que podem servir como fundamentos para investigações futuras, os autores propõem três questões de reflexão destinadas a orientar futuros estudos:

1. No contexto dos impactos da produção de energia renovável, e à luz do potencial de garantir ocupações mais consentâneas com o desenvolvimento sustentável, verifica-se uma clivagem entre a retórica dos benefícios de descarbonização e a sua efetiva implementação no território?

2. Como é que se pode integrar a consideração dos diferentes interesses sociais, económicos e ambientais no ordenamento território para as grandes infraestruturas de produção de energia renovável?

3. Como podem os instrumentos de planeamento responder às aspirações das comunidades locais e movimentos de contestação em contextos de conflitos com a preservação da biodiversidade?

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como considerações finais podemos afirmar que a concretização da transição energética implicará extensas transformações territoriais num curto prazo. Nos próximos anos, a produção de energia renovável poderá emergir como um dos principais impulsionadores de alterações no uso do solo em Portugal.

Este estudo apresentou uma proposta metodológica para mensurar e avaliar a seleção de localizações para a implementação de projetos de energia solar fotovoltaica, com base em princípios de sustentabilidade. O índice desenvolvido representa um protótipo de um sistema espacial de apoio à decisão, com o potencial de contribuir para uma implementação mais equilibrada das transformações territoriais associadas à produção de energia.

A composição do índice, derivada da combinação de sete fatores de aptidão, revelou que a capacidade de cumprir os parâmetros definidos é espacialmente assimétrica. Localizações com aptidão elevada foram identificadas em várias regiões do território, sugerindo a possibilidade de uma repartição geográfica mais equilibrada para a descarbonização da produção de energia. No entanto, também se identificou que a localização das centrais solares previstas nem sempre coincide com as áreas onde se estimou maior sustentabilidade. Constatou-se que a escolha de localização tem sido predominantemente baseada em critérios técnicos e económicos, em alguns casos negligenciando as implicações ambientais resultantes da instalação dessas infraestruturas. Dada a complexidade da avaliação de sustentabilidade na transição energética, torna-se imperativo aprimorar abordagens semelhantes, considerando a inclusão de critérios adicionais, a fim de obter um índice mais robusto que, em última instância, poderá servir como uma primeira análise ao processo de licenciamento de projetos.

AGRADECIMENTOS

Esta investigação foi apoiada pela bolsa de doutoramento do autor André Alves, financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), e com fundos do Orçamento de Estado, no âmbito do Programa MIT Portugal (PRT/BD/154418/2023). Agradece-se simultaneamente o apoio do Grupo de Investigação MOPT (Modelação, Ordenamento e Planeamento Territorial) do Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa (UIDB/00295/2020 e UIDP/00295/2020).

CONTRIBUTOS DOS/AS AUTORES/AS

André Alves: Conceptualização; Metodologia; Software; Validação; Análise formal; Investigação; Recursos; Curadoria dos dados; Escrita – preparação do esboço original; Redação – revisão e edição; Visualização. **Eduarda Marques da Costa:** Conceptualização; Metodologia; Validação; Investigação; Redação – revisão e edição; Supervisão. **Eduardo Gomes:** Conceptualização; Metodologia; Validação; Investigação; Redação – revisão e edição; Supervisão. **Samuel Niza:** Conceptualização; Metodologia; Validação; Investigação; Redação – revisão e edição; Supervisão.

ORCID ID

André Alves  <https://orcid.org/0000-0002-8979-8906>

Eduarda Marques da Costa  <https://orcid.org/0000-0001-5070-3562>

Eduardo Gomes  <https://orcid.org/0000-0001-8703-1763>

Samuel Niza  <https://orcid.org/0000-0003-0679-4027>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). Is the use of renewable energy sources an answer to the problems of global warming and pollution? *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(2), 99-154. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.498754>

- Al-Mulali, U., Solarin, S. A., Sheau-Ting, L., & Ozturk, I. (2016). Does moving towards renewable energy causes water and land inefficiency? An empirical investigation. *Energy Policy*, 93, 303-314. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.023>
- Aly, A., Jensen, S. S., & Pedersen, A. B. (2017). Solar power potential of Tanzania: identifying csp and pv hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis. *Renewable Energy*, 113, 159-175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.077>
- Ascensão, F., Chozas, S., Serrano, H., & Branquinho, C. (2023). Mapping potential conflicts between photovoltaic installations and biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 287, 110331. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110331>
- Bączkiewicz, A., Watrobski, J., & Sałabun, W. (2021). Towards MCDA Based Decision Support System Addressing Sustainable Assessment. In E. Insfran, F. González, S. Abrahão, M. Fernández, C. Barry, H. Linger & C. Schneider (Eds.), *Information Systems Development: crossing boundaries between development and operations (DevOps) in Information Systems* (ISD2021 Proceedings). Universitat Politècnica de València.
- Barral, M. Á., Ruíz Díez, A., Prados, M.-J., García-Marín, R., & Delicado, A. (2023). Energías renovables y cambios de usos del suelo en el sur de la Península Ibérica: una lectura territorial de la política energética. [Renewable energies and land use changes in the south of the Iberian Peninsula: a territorial reading of energy policy]. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 97, 1-46. <https://doi.org/10.21138/bage.3356>
- Blaydes, H., Potts, S. G., Whyatt, J. D., & Armstrong, A. (2021). Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111065>
- Böhringer, C., & Jochem, P. E. P. (2007). Measuring the immeasurable: a survey of sustainability indices. *Ecological Economics*, 63(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.008>
- Cabral, P., Campos, F. S., David, J., & Caser, U. (2021). Disentangling ecosystem services perception by stakeholders: an integrative assessment based on land cover. *Ecological Indicators*, 126, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107660>
- Calvert, K., & Mabee, W. (2015). More solar farms or more bioenergy crops? Mapping and assessing potential land-use conflicts among renewable energy technologies in eastern Ontario, Canada. *Applied Geography*, 56, 209-221. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.028>
- Cameron, D. R., Cohen, B. S., & Morrison, S. A. (2012). An approach to enhance the conservation-compatibility of solar energy development. *PLoS ONE*, 7(6), e38437. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038437>
- Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>
- Cole, B., Smith, G., de la Barrera-Bautista, B., Hamer, A., Payne, M., Codd, T. ... Balzter, H. (2022). Dynamic Landscapes in the UK Driven by Pressures from Energy Production and Forestry-Results of the CORINE Land Cover Map 2018. *Land*, 11(2), 192. <https://doi.org/10.3390/land11020192>
- Dannreuther, R. (2016). EU-Russia energy relations in context. *Geopolitics*, 21(4), 913-921. <https://doi.org/10.1080/14650045.2016.1222521>
- Diego, J. C., Bonete, S., & Chías, P. (2022). VIA-7 Method: A seven perceptual parameters methodology for the assessment of visual impact caused by wind and solar facilities on the landscape in cultural heritage sites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 12528. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112528>
- Direção Geral da Energia e Geologia. (2023a). *Produção Anual e Potência Instalada* [Annual Production and Installed Power]. DGEG. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/electricidade/producao-anual-e-potencia-instalada/>
- Direção Geral da Energia e Geologia. (2023b). *Estatísticas Rápidas das Renováveis* [Quick Renewables Statistics]. DGEG. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/publicacoes/estatisticas-rapidas-das-renovaveis/>
- Direção Geral do Território. (2023). *Relatório do Estado do Ordenamento do Território 2022* [State of Spatial Planning Report 2022]. DGT. <https://reot.dgterritorio.gov.pt/>
- Direção Geral do Território. (2019). Especificações técnicas da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) de Portugal Continental para 2018. Relatório Técnico. Direção Geral do Território [Technical specifications of the Land Use and Occupation Charter (COS) of Continental Portugal for 2018. Technical Report. General Directorate of the Territory.]. DGT. https://www.dgterritorio.gov.pt/sites/default/files/documentos-publicos/2019-12-26-11-47-32-0_ET-COS-2018_v1.pdf
- Dolezal, A. G., Torres, J., & O'Neal, M. E. (2021). Can Solar Energy Fuel Pollinator Conservation? *Environmental Entomology*, 50(4), 757-761. <https://doi.org/10.1093/ee/nvab041>

- Dunlap, A. (2023). Spreading 'green' infrastructural harm: mapping conflicts and socio-ecological disruptions within the European Union's transnational energy grid. *Globalizations*, 20(6), 907-931. <https://doi.org/10.1080/14747731.2021.1996518>
- Eichhorn, M., Masurowski, F., Becker, R., & Thrän, D. (2019). Wind energy expansion scenarios: a spatial sustainability assessment. *Energy*, 180, 367-375. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.054>
- Elmallah, S., Hoen, B., Fujita, K. S., Robson, D., & Brunner, E. (2023). Shedding light on large-scale solar impacts: An analysis of property values and proximity to photovoltaics across six U.S. states. *Energy Policy*, 175, 113425. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113425>
- EUROSERV'ER. (2023). *Photovoltaic barometer*. Euroserv-er. <https://www.euroserv-er.org/photovoltaic-barometer-2023/>.
- Farinós-Dasí, J. (2022). *Las energías renovables como fuente de un nuevo conflicto territorial e interinstitucional* [Renewable energies as the source of a new territorial and interinstitutional conflict]. In M. I. Martín Jiménez, J. I. Plaza Gutiérrez & D. Ramos Pérez (Eds.), *XVII Coloquio Ibérico de Geografía - Nuevas fronteras y nuevos horizontes en la Geografía Ibérica: políticas y transformaciones territoriales* [XVII Iberian Geography Colloquium - New frontiers and new horizons in Iberian Geography: policies and territorial transformations] (pp. 609-619). Asociación Española de Geografía.
- Fouquet, R. (2010). The slow search for solutions: lessons from historical energy transitions by sector and service. *Energy Policy*, 38(11), 6586-6596. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.029>
- Gardiner, N. J., Roberts, J. J., Johnson, G., Smith, D. J., Bond, C. E., Knipe, R. ... O'Donnell, M. (2023). Geosciences and the Energy Transition. *Earth Science, Systems and Society*, 3, 1-22. <https://doi.org/10.3389/esss.2023.10072>
- Ghezloun, A., Saidane, A., & Merabet, H. (2017). The COP 22 New commitments in support of the Paris Agreement. *Energy Procedia*, 119, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.040>
- Granovsky-Larsen, S., & Larreátegui Benavides, P. (2023). Environmental conflict and the expansion of renewable energy in Central America: exploring Canadian participation. *Canadian Journal of Latin American and Caribbean Studies*, 48(2), 192-214. <https://doi.org/10.1080/08263663.2023.2166267>
- Guaita-Pradas, I., Marques-Perez, I., Gallego, A., & Segura, B. (2019). Analyzing territory for the sustainable development of solar photovoltaic power using GIS databases. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(12), 764. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7871-8>
- Guoqing, L., Hernandez, R. R., Blackburn, G. A., Davies, G., Hunt, M., Whyatt, J. D., & Armstrong, A. (2021). Ground-mounted photovoltaic solar parks promote land surface cool islands in arid ecosystems. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 1, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2021.100008>
- Havrysh, V., Kalinichenko, A., Szafrank, E., & Hruban, V. (2022). Agricultural Land: Crop Production or Photovoltaic Power Plants. *Sustainability*, 14(9), 5099. <https://doi.org/10.3390/su14095099>
- Hermann, S., Miketa, A., & Fichaux, N. (2014). *Estimating the Renewable Energy Potential in Africa* (Working Paper). IRENA. <https://www.irena.org/publications/2014/Aug/Estimating-the-Renewable-Energy-Potential-in-Africa-A-GIS-based-approach>
- Hermoso, V., Bota, G., Brotons, L., & Morán-Ordóñez, A. (2023). Addressing the challenge of photovoltaic growth: Integrating multiple objectives towards sustainable green energy development. *Land Use Policy*, 128, 106592. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106592>
- Hernandez, R. R., Armstrong, A., Burney, J., Ryan, G., Moore-O'Leary, K., Diédhiou, I. ... Kammen, D. M. (2019). Techno-ecological synergies of solar energy for global sustainability. *Nature Sustainability*, 2(7), 560-568. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0309-z>
- Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B. ... Allen, M. F. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766-779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>
- Hernandez, R. R., Hoffacker, M. K., & Field, C. B. (2015). Efficient use of land to meet sustainable energy needs. *Nature Climate Change*, 5(4), 353-358. <https://doi.org/10.1038/nclimate2556>
- Hernandez, R. R., Hoffacker, M. K., Murphy-Mariscal, M. L., Wu, G. C., & Allen, M. F. (2015). Solar energy development impacts on land cover change and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(44), 13579-13584. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517656112>
- Ioannidis, R., & Koutsoyiannis, D. (2020). A review of land use, visibility and public perception of renewable energy in the context of landscape impact. *Applied Energy*, 276, 115367. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115367>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change: working group iii contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>

- International Renewable Energy Agency. (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, Volume 1*. IREA. <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- Jaforullah, M., & King, A. (2014). Does the use of renewable energy sources mitigate CO2 emissions? A reassessment of the US evidence. *Energy Economics*, 49, 711-717. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.04.006>
- Janke, J. R. (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35(10), 2228-2234. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.014>
- Joint Research Centre. (2022). Acceleration Areas for Renewables. JRC. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-tools-databases/energy-and-industry-geography-lab/acceleration-areas-renewables_en
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply. *Frontiers in Energy Research*, 9, 1-45. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>
- Kiesecker, J., Baruch-Mordo, S., Heiner, M., Negandhi, D., Oakleaf, J., Kennedy, C., & Chauhan, P. (2020). Renewable energy and land use in India: a vision to facilitate sustainable development. *Sustainability*, 12(1), 281. <https://doi.org/10.3390/su12010281>
- Kim, J., Park, E., Song, C., Hong, M., Jo, H. W., & Lee, W. K. (2022). How to manage land use conflict between ecosystem and sustainable energy for low carbon transition? Net present value analysis for ecosystem service and energy supply. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1044928>
- Koelman, M., Hartmann, T., & Spit, T. J. M. (2022). When tensions become conflicts: wind turbine policy implementation and development in the Netherlands. *Journal of Environmental Planning and Management*, 65(3), 375-397. <https://doi.org/10.1080/09640568.2021.1885018>
- Koelman, M., Hartmann, T., & Spit, T. J. M. (2018). Land Use Conflicts in the Energy Transition: Dutch Dilemmas. *TeMA - Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 11(3), 273-284. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/5830>
- Kontogianni, A., Tourkolias, C., Skourtos, M., & Damigos, D. (2014). Planning globally, protesting locally: patterns in community perceptions towards the installation of wind farms. *Renewable Energy*, 66, 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.074>
- Kuzemko, C., Blondeel, M., Dupont, C., & Brisbois, M. C. (2022). Russia's war on Ukraine, European energy policy responses & implications for sustainable transformations. *Energy Research & Social Science*, 93, 102842. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102842>
- Levin, M. O., Kalies, E. L., Forester, E., Jackson, E. L. A., Levin, A. H., Markus, C. ... Hernandez, R. R. (2023). Solar Energy-driven Land-cover Change Could Alter Landscapes Critical to Animal Movement in the Continental United States. *Environmental Science and Technology*, 57(31), 11499-11509. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00578>
- Liu, J. L., Fu, J., Wong, S. S., & Bashir, S. (2023). Energy Security and Sustainability for the European Union after/during the Ukraine Crisis: a perspective. *Energy and Fuels*, 37(5), 3315-3327. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02556>
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Moore-O'Leary, K. A., Hernandez, R. R., Johnston, D. S., Abella, S. R., Tanner, K. E., Swanson, A. C., & Lovich, J. E. (2017). Sustainability of utility-scale solar energy: critical ecological concepts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(7), 385-394. <https://doi.org/10.1002/fee.1517>
- Moradi, S., Yousefi, H., Noorollahi, Y., & Rosso, D. (2020). Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: case study of Alborz Province, Iran. *Energy Strategy Reviews*, 29, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100478>
- Niebuhr, B. B., Sant'Ana, D., Panzacchi, M., van Moorter, B., Sandström, P., Morato, R. G., & Skarin, A. (2022). Renewable energy infrastructure impacts biodiversity beyond the area it occupies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(48), 10-12. <https://doi.org/10.1073/pnas.2208815119>
- Nøland, J. K., Auxepales, J., Rousset, A., Perney, B., & Falletti, G. (2022). Spatial energy density of large-scale electricity generation from power sources worldwide. *Scientific Reports*, 12(1), 21280. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25341-9>
- Olabi, A. G., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112111>
- Osička, J., & Černoch, F. (2022). European energy politics after Ukraine: the road ahead. *Energy Research and Social Science*, 91, 102757. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102757>

- Ozturk, D., & Batuk, F. (2011). Implementation of GIS-based multicriteria decision analysis with VB in ArcGIS. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 10(6), 1023-1042. <https://doi.org/10.1142/S0219622011004695>
- Pan, X., Shao, T., Zheng, X., Zhang, Y., Ma, X., & Zhang, Q. (2023). Energy and sustainable development nexus: a review. *Energy Strategy Reviews*, 47, 101078. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101078>
- Perpiña Castillo, C., Batista e Silva, F., & Lavalle, C. (2016). An assessment of the regional potential for solar power generation in EU-28. *Energy Policy*, 88(2016), 86-99. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.004>
- Picchi, P., Oudes, D., & Stremke, S. (2023). Regional Strategy, Municipality Plans and Site Designs for Energy Transition in Amsterdam, The Netherlands: how sustainable are implementation processes on different spatial levels? *Sustainability*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15075876>
- Poggi, F., Firmino, A., & Amado, M. (2018). Planning renewable energy in rural areas: impacts on occupation and land use. *Energy*, 155, 630-640. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.009>
- Rehbein, J. A., Watson, J. E. M., Lane, J. L., Sontner, L. J., Venter, O., Atkinson, S. C., & Allan, J. R. (2020). Renewable energy development threatens many globally important biodiversity areas. *Global Change Biology*, 26(5), 3040-3051. <https://doi.org/10.1111/gcb.15067>
- República Portuguesa. (2023). Decreto-Lei n.º 11/2023, de 10/02/2023 - Procede à reforma e simplificação dos licenciamentos ambientais [Decree-Law No. 11/2023, of 10/02/2023 - Reforms and simplifies environmental licensing]. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/11/2023/02/10/p/dre/pt/html>
- República Portuguesa. (2022a). Decreto-Lei n.º 30-A/2022, de 18/04/2022 - Aprova medidas excecionais que visam assegurar a simplificação dos procedimentos de produção de energia a partir de fontes renováveis [Decree-Law No. 30-A/2022, of 18/04/2022 - Approves exceptional measures that aim to ensure the simplification of energy production procedures from renewable sources]. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/30-a/2022/p/cons/20221019/pt/html>
- República Portuguesa. (2022b). Decreto-Lei n.º 72/2022, de 19/10/2022 - Altera as medidas excecionais para a implementação de projetos e iniciativas de produção e armazenamento de energia de fontes renováveis [Decree-Law No. 72/2022, of 10/19/2022 - Amends the exceptional measures for the implementation of projects and initiatives for the production and storage of energy from renewable sources]. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/72/2022/10/19/p/dre/pt/html>
- Semeraro, T., Pomes, A., Del Giudice, C., Negro, D., & Aretano, R. (2018). Planning ground based utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services. *Energy Policy*, 117, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.050>
- Silva, H. G., Abreu, E. F. M., Lopes, F. M., Cavaco, A., Canhoto, P., Neto, J., & Collares-Pereira, M. (2020). Solar Irradiation Data Processing using estimator MatriceS (SIMS) validated for Portugal (southern Europe). *Renewable Energy*, 147, 515-528. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.009>
- Simões, S. G., Barbosa, J., Oliveira, P., Patinha, P., Quental, L., Catarino, J. ... Picado, A. (2023) *Identificação de áreas com menor sensibilidade ambiental e patrimonial para localização de unidades de produção de eletricidade renovável* [Identification of areas with less environmental and heritage sensitivity for locating renewable electricity production units]. LNEG. <https://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/4006>
- Skjærseth, J. B. (2021). Towards a European Green Deal: the evolution of EU climate and energy policy mixes. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 21(1), 25-41. <https://doi.org/10.1007/s10784-021-09529-4>
- Stremke, S., & Dobbeltstein, A. (2013). Sustainable Energy Landscapes: designing, planning and development. CRC.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2018). *Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. UNFCCC. <https://unfccc.int/documents/184656>
- Valera, F., Bolonio, L., La Calle, A., & Moreno, E. (2022). Deployment of Solar Energy at the Expense of Conservation Sensitive Areas Precludes Its Classification as an Environmentally Sustainable Activity. *Land*, 11(12), 1-20. <https://doi.org/10.3390/land11122330>
- van de Ven, D. J., Capellan-Peréz, I., Arto, I., Cazcarro, I., de Castro, C., Patel, P., & Gonzalez-Eguino, M. (2021). The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports*, 11(1), 2907. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>
- Vezzoni, R. (2023). Green growth for whom, how and why? The REPowerEU Plan and the inconsistencies of European Union energy policy. *Energy Research and Social Science*, 101, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103134>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>

- Wolf, S., Teitge, J., Mielke, J., Schütze, F., & Jaeger, C. (2021). The European Green Deal – more than climate neutrality. *Intereconomics*, 56(2), 99-107. <https://doi.org/10.1007/S10272-021-0963-Z>
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- Zardo, L., Bradaschia, M. G., Musco, F., & Maragno, D. (2023). Promoting an integrated planning for a sustainable upscale of renewable energy: a regional GIS-based comparison between ecosystem services tradeoff and policy constraints. *Renewable Energy*, 217, 119131. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119131>