

ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO PARA INSTALAÇÃO DE USINA À BASE DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA

Maria Isadora de Faveri Marquesine¹
Willian Douglas Sbitkowski Chamma¹
Danielli Batistella¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná

DOI: 10.47168/rbe.v28i2.693

RESUMO

Diante da atual necessidade da transição para energias renováveis, o trabalho apresenta um estudo de localização para instalação de usina à base de energia solar concentrada (CSP) no município de Pato Branco, localizado no sudoeste do Paraná. Utilizaram-se fatores restritivos, para remover áreas de preservação ou de interesse econômico, e fatores de ponderação, para indicar qual a aptidão da área disponível. Para normalizar diferentes critérios qualitativos e quantitativos e obter a importância relativa de cada critério, utilizou-se o Processo Analítico Hierárquico (AHP), um método de decisão multicritério amplamente utilizado na literatura. Algumas áreas aptas para a disposição de coletores e energia solar concentrada foram encontradas, e sugere-se a instalação de uma usina híbrida CSP-biomassa para melhor aproveitar os recursos disponíveis no município.

Palavras-chave: Estudo de localização; Energia Solar Concentrada; Geoprocessamento; AHP.

ABSTRACT

Due to the current need of energy transition to renewables, this work presents a location study for the installation of a power plant based on concentrated solar power (CSP) in the municipality of Pato Branco, located in southwestern Paraná, Brazil. Restrictive criteria were applied to remove environmental preservation areas and high economic interest areas. Positive indicators were combined to identify the suitability of the available land. To normalize different qualitative and quantitative criteria, the Analytic Hierarchy Process (AHP) — a multicriteria decision-making method widely used in location studies — was used. Some suitable areas for the set-up of CSP collectors were found, and we suggest that hybrid CSP-biomass plants would be installed, so that the resources available can be used to their fullest.

Keywords: Location study; Concentrated Solar Power; Geoprocessing; AHP.

1. INTRODUÇÃO

O sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) afirma que, inequivocamente, a ação humana causou alterações climáticas rápidas e difundidas na atmosfera, oceano, criosfera e biosfera. Como o aquecimento médio desde 1850 encontra-se na casa dos 1,07°C, faz-se necessário que as emissões líquidas de CO₂ tornem-se zero a fim de mitigar as mudanças climáticas e evitar futuros desastres ambientais (IPCC, 2021). Estima-se que 85% da energia primária provém de combustíveis fósseis, e a queima destes é responsável por 56,6% das emissões globais de gases de efeito estufa (IPCC, 2021). Desta forma, é notável que as energias renováveis terão um papel crucial na política climática nas próximas décadas.

A matriz elétrica mundial é composta majoritariamente de fontes não renováveis, com a queima de combustíveis fósseis, como carvão e gás natural (INTERNACIONAL ENERGY AGENCY, 2020). A matriz brasileira é uma exceção, já que as fontes renováveis representam 83% da oferta de eletricidade no país, sendo que 64,9% da energia provém de usinas hidrelétricas (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). No entanto, com a crescente demanda por energia elétrica, a escassez de rios com potencial hidrelétrico inexplorado e as preocupações climáticas, é necessário que o país volte suas atenções a outras fontes renováveis, a fim de gerar energia limpa e sustentável.

O potencial técnico da energia solar tem estimativas variáveis, que ficam entre 1.575 e 49.837 exajoules¹ por ano (EJ/ano) (IPCC, 2012). A produção de energia mundial no ano de 2018 foi de 14.282 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (INTERNACIONAL ENERGY AGENCY, 2020), o equivalente a 597,96 EJ. Dessa forma, a energia solar tem capacidade de suprir, grosseiramente, de 2 a 83 vezes toda a energia utilizada no planeta.

A energia solar tem o maior potencial energético dentre as fontes renováveis, e transformar a radiação em energia elétrica tem sido um desejo desde o século XIX. No entanto, os maiores desenvolvimentos vieram somente com as crises do petróleo, nos anos 1970. A pesquisa sobre a energia solar também tem sido motivada pela preocupação sobre a possível escassez dos combustíveis fósseis. Com o declínio dos preços do petróleo, nos anos 1980, o interesse internacional na substituição gradativa de combustíveis fósseis em favor de fontes de energia limpas se dissipou (BANCO MUNDIAL, 2021; MANN, 2018). Não obstante, a recente perspectiva crítica das mudanças climáticas reacendeu o interesse em fontes renováveis para a geração e fornecimento de energia elétrica, em prol da sustentabilidade e acesso

1 1 EJ = 10¹⁸ J

A Energia Solar Concentrada (CSP) é gerada a partir de arranjos de espelhos que concentram a radiação solar (principalmente a radiação solar direta normal) em superfícies pequenas, a fim de aquecer um líquido, sólido ou gás que é utilizado em um processo termodinâmico que converte o calor em energia elétrica (AZEVEDO, 2016; IPCC, 2012). A maioria das formas de gerar energia elétrica envolve o aquecimento de um fluido a altas temperaturas. Portanto, uma vantagem da energia solar concentrada é que ela utiliza processos térmico-elétricos bem conhecidos. Assim, há quatro vantagens-chave da tecnologia CSP: (i) Pode ser instalada para suprir diferentes capacidades e condições, indo desde dezenas de kW até múltiplos MW de potência; (ii) pode integrar armazenamento térmico/termoquímico e outras fontes de calor (biomassa, gás natural, etc.), que permite a geração de energia por horas após o pôr do sol; (iii) tem componentes modulares e escaláveis; (iv) não requer materiais exóticos (e.g. silício e lítio) para a construção, sendo que a maioria dos materiais são abundantes no mundo (vidro, alumínio, concreto) (IPCC, 2012).

Há quatro tipos principais de coletores de energia solar concentrada, como exibido na Figura 1, adaptada de IPCC (2012). Essas tecnologias estão em níveis de maturidade tecnológica distintos, sendo que o tipo de coletor mais comum é o cilíndrico parabólico, que conta com 85% da quota de mercado atual (BANCO MUNDIAL, 2021).

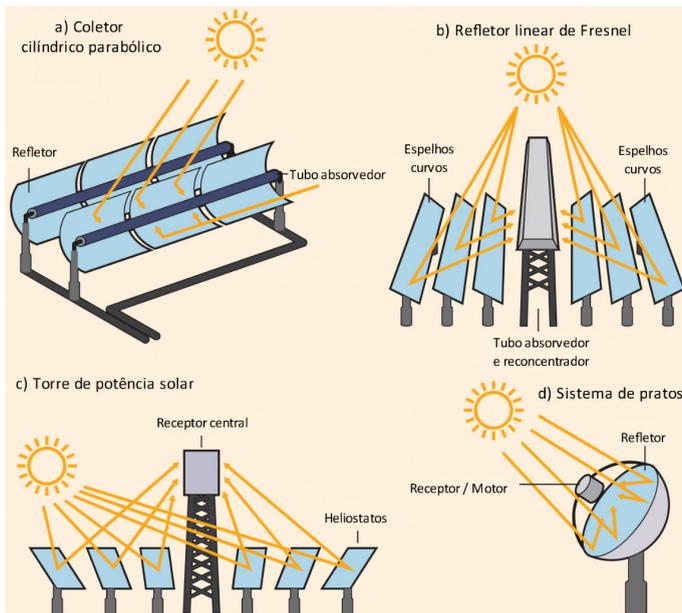


Figura 1 - Tipos de coletores CSP

No que concerne a competitividade no mercado, o custo da energia solar concentrada tende a diminuir progressivamente nos próximos anos. Atualmente, o custo médio nivelado de energia está na casa de 18 centavos de dólar (na cotação de 2019) por kWh gerado (IRENA, 2019). O custo já é competitivo com combustíveis fósseis, chegando a 0,073 centavos de dólar por kWh em algumas localidades (DLR, 2021), e previsões apontam que a tecnologia CSP terá custos plenamente competitivos com tecnologias não renováveis em 2025 (BANCO MUNDIAL, 2006). Essa previsão é plausível, já que na década de 2010 o custo da CSP caiu 50% e a capacidade instalada chegou a 6,2 GW (REN21, 2021).

A geração de eletricidade a partir de fontes renováveis tem mostrado contínuo aumento, e vários estudos de localização de usinas solares têm sido realizados ao redor do mundo. Nesse sentido, o uso de tecnologias da geoinformação (sistemas de informação geográfica, banco de dados geográficos, álgebra de mapas, análise multicritério, etc.) tem sido imprescindível, já que elas permitem a realização de procedimentos tecnológico-científicos necessários para identificar áreas com grande potencial energético (AZEVEDO, 2016). Dessa forma, a geoinformação pode fornecer conhecimento à esfera pública e privada, auxiliando na tomada de decisões para o desenvolvimento sustentável (RODRIGUES; COELHO; CABRAL, 2017).

O número de estudos de localização de empreendimentos de energia renovável que utilizam métodos de análise multicritério tem aumentado a cada ano. Esses métodos são altamente eficazes para chegar à soluções eficientes, já que eles consideram vários fatores que permeiam as análises espaciais, tais como condições ambientais, topográficas, econômicas, etc. (ILBAHAR; CEBI; KAHRAMAN, 2019). Contudo, esse tipo de estudo ainda não é amplamente difundido no Brasil.

Em um estudo de localização de usina solar termoelétrica de autoria brasileira, o potencial energético de Pernambuco foi analisado. A partir dos dados, excluiu-se áreas inadequadas, tais como unidades de conservação, áreas de preservação permanente (APPs), territórios indígenas e quilombolas, áreas urbanas e de expansão urbana e áreas de alto potencial agrícola. Em seguida, foi feita a análise ponderada multicritério, levando em conta critérios ambientais (uso do solo), climáticos (irradiação solar direta normal), topográficos (declive) e de localização (distância a linhas de transmissão, distância aos recursos hídricos, distância às principais estradas, distância às áreas urbanas). O estudo revelou que algumas municipalidades pernambucanas tem grande potencial de geração de energia solar (AZEVEDO; CANDEIAS; TIBA, 2017).

Em outro estudo nacional, Burgi (2013) afirma que vários estados brasileiros têm potencial para a instalação de usinas CSP, consta-

tando que essa tecnologia pode ter presença considerável na matriz elétrica brasileira no longo prazo. Os autores destacam os estados da Bahia e de São Paulo como tendo os maiores potenciais para a instalação de plantas heliotérmicas.

Buscando promover uma política de desenvolvimento da CSP no Brasil, Peñafiel (2016) analisou o potencial técnico, aspectos econômicos, e modelos de expansão da energia solar térmica no país, e defende a implantação de usinas CSP combinadas com biomassa.

Outro estudo excluiu sítios religiosos, turísticos e de patrimônio mundial, áreas de vegetação nativa e vida silvestre, aeroportos, corpos d'água e áreas de grande ocupação humana. Após, os pesos foram calculados através do Processo Analítico Hierárquico (AHP), utilizando fatores de climatologia (radiação solar global, duração da luz solar, temperatura, umidade relativa), topografia (altitude, declive, orientação), e de localização (proximidade a linhas de transmissão, proximidade à estrada). Este projeto, desenvolvido por Doorga et al. (2019) na ilha de Mauritius, apontou que três sítios são altamente adequados para a instalação de uma usina solar. Também vale a pena mencionar os trabalhos de Lindberg et al. (2021), Mensour et al. (2019) e Sánches-Lozano et al. (2015), que oferecem uma visão norteadora do estado-da-arte dessa área de estudo.

Constata-se que há extensa literatura científica internacional sobre o tópico, que apenas recentemente recebeu atenção no Brasil. Geralmente, os estudos de localização levam em consideração os critérios supramencionados, com exceção ou adição de alguns fatores, a depender de cada caso. Sem embargo, os fatores base são o uso do solo, climático, topográfico e de infraestrutura, além do econômico, não abordado neste trabalho.

O presente trabalho busca dispor da metodologia AHP para conduzir um estudo de localização no município de Pato Branco - PR, a fim de investigar se existem áreas adequadas à instalação de usinas à base de energia solar concentrada no município, e identificar quais as regiões potenciais mais apropriadas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delimitação da área de estudo

A área de estudo compreende o município de Pato Branco – PR (Figura 2), localizado no sudoeste paranaense. Encontra-se na latitude $26^{\circ}13'43.04''\text{S}$ e longitude $52^{\circ}40'24.40''\text{O}$, a uma altitude média de 760m (FEPESE, 2020).

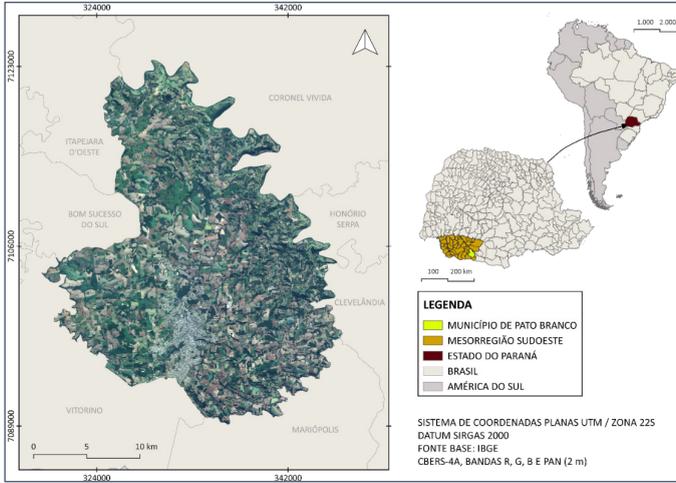


Figura 2 - Mapa de localização de Pato Branco – PR

2.2 Metodologia de definição e processamento dos dados

Neste trabalho, a metodologia (Figura 3) baseia-se na definição hierárquica dos critérios de uso do solo, climático, topográfico e de infraestrutura, e seus respectivos subcritérios dos Planos de Informação (PIs), com a aplicação de técnicas de geoprocessamento em sistemas de informações geográficas. Tanto o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) quanto a álgebra de mapas contribui para a remoção de áreas em condições restritivas, assim como a ponderação sobre a área de proveito, a fim de executar uma combinação matemática dos PIs utilizados.

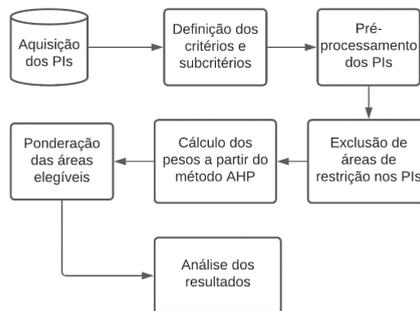


Figura 3 - Fluxograma da metodologia do trabalho

Os PIs abarcaram os principais fatores de interferência na manipulação do solo, para averiguar qual é o melhor local para a possível implantação de uma usina de energia solar concentrada.

Levando em consideração a realidade de médio porte (SECRETARIA NACIONAL DE ASSISTÊNCIA SOCIAL - SNAS, 2015) do município de Pato Branco – contando com aproximadamente 85 mil habitantes (IBGE, 2021) –, os parâmetros de influência sobre o projeto de estudo pautaram-se nos seguintes critérios de ponderação: Radiação Solar Direta Normal, obtida a partir do SolarGIS (SOLARGIS, 2021); declividade, obtida a partir do TOPODATA (VALERIANO, 2008); distância aos recursos hídricos, às rodovias, às linhas de transmissão e à mancha urbana, obtidas a partir do processamento dos shapefiles disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) (CATÁLOGO DE METADADOS DA ANA, 2019), Departamento de Estradas e Rodagem (DER) (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO PARANÁ, 2020), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016) e Instituto de Água e Terra (IAT) (INSTITUTO DE ÁGUA E TERRA, 2020), respectivamente.

Também há os fatores de restrição do uso do solo: a alta aptidão agrícola, mancha urbana, corpos d'água, floresta nativa, plantios florestais, várzeas, áreas construídas e as áreas respaldadas pelo Código Florestal (Lei nº 12.651/12, art. 30), que legisla sobre a preservação das Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Unidades de Conservação (UCs), além dos recursos hídricos já inclusos como áreas inaptas para uso. Cumpre-se assim, o objetivo de “preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas” (CASA CIVIL - PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2012).

Desse modo, as aptidões agrícolas média e baixa, conjuntamente com as áreas de pastagem e campo, mineração e solo exposto foram consideradas aptas a posterior sobreposição dos PIs. E para isso, com a aplicação de operações topológicas em ambiente SIG, foi possível excluir as porções de restrição sobre a extensão do município, utilizando a lógica booleana.

Como se trata de uma restrição, a lógica booleana faz a distinção primária do que pode e do que não pode ser ocupado para a determinada proposta de implantação de uma usina solar. Esta operação proporciona um diagnóstico qualitativo, gerando um mapa temático a partir de regras aplicadas a geo-campos, como visto no mapa da Figura 4d. Além disso, dispõe da ferramenta de cruzar dois ou mais planos de informação. Pode-se tomar como exemplo o próprio mapa de aptidão agrícola, sintetizando os mapas de solo, de declividade e demais conjuntos adicionais.

Com o uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) ArcGIS Pro (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI), 2021) e QGIS 3.18.2 with GRASS 7.8.5 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021), os mapas de restrição, dos PIs e o de síntese puderam ser elaborados de modo a prever a disponibilidade e nível de aptidão do território do município de Pato Branco, segundo suas condições climáticas, topográficas e de infraestrutura. Por conseguinte, a supressão de áreas inaproveitáveis constituiu a parte restritiva de todo o perímetro do município.

Para garantir a consistência do modelo e dos respectivos resultados, os SIGs utilizados serviram como recursos que auxiliam a prever e visualizar um evento, determinado pelos critérios empregados, em forma de dados geográficos, tanto qualitativos quanto quantitativos. Por definição, o SIG se caracteriza como um conjunto de tecnologias implementadas em ambiente computacional que é capaz de manipular, armazenar e recuperar dados objetivando simular, a partir de simplificações, situações e contextos existentes no mundo real (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

Mediante a manipulação dos PIs nos *softwares*, é possível realizar análises espaciais e integrar diferentes dados, gerando informações associadas a diversos fatores que influenciam a decisão e efetivação de um projeto e/ou evento, como ocorre na instalação de uma usina a base de energia solar. Neste caso, como propõe (FISCHER; SCHOLTEN; UNWIN, 2019), há dois seguimentos: a modelagem do terreno, que se baseia em modelos determinísticos nas áreas socioeconômica e ambiental; e a investigação estatística a partir de dados geográficos, usando-os de base para verificar a compatibilidade entre as informações coletadas e fundamentar sua escolha.

Neste trabalho, tomou-se como finalidade a determinação de um modelo espacial, por meio da integração de informações (PIs) favoráveis ao propósito de estudo, após a eliminação de fatores excludentes.

As técnicas utilizadas na análise exploratória e de análise espacial ampararam-se na utilização de operadores topológicos e de transformação, como o fatiamento e a ponderação. Os critérios e pesos apresentados abaixo (Tabela 1) foram determinados de acordo com práticas presentes na literatura, e os processos para a estipulação desses valores estão detalhados no restante da seção.

Tabela 1 - Critérios para ponderação dos Planos de Informação pelo método de análise de decisão multicritério

Critério (fonte)	Subcritério	Classificação	Peso
Climático (SolarGIS)	Radiação Solar kWh / m ² /dia)	4,37 - 4,72	1
		4,73 - 4,82	3
		4,83 - 4,89	5
		4,90 - 4,94	7
		4,95 - 5,00	9
Topográfico (TOPODATA)	Declive (%)	0 - 3	9
		3 - 8	8
		8 - 20	7
		20 - 45	5
		> 75	1
Infraestrutura (ANA, ONS, IAT e DER)	Recursos hídricos (km)	0 - 0,97	9
		0,98 - 2,03	7
		2,04 - 3,12	5
		3,13 - 4,28	3
		4,29 - 6,17	1
	Rodovias (km)	0 - 1,79	9
		1,80 - 3,91	7
		3,92 - 6,19	5
		6,20 - 9,01	3
		9,02 - 13,84	1
	Linhas de Transmissão (km)	0 - 0,94	9
		0,95 - 2,15	7
		2,16 - 3,85	5
		3,86 - 5,96	3
		5,97 - 9,63	1
	Mancha urbana (km)	0 - 1,92	1
		1,93 - 4,19	3
		4,20 - 6,41	5
		6,42 - 8,72	7
		8,73 - 12,56	9

O PI de fator climático, exposto na Figura 4a, foi obtido do recorte de dados do SolarGIS (média anual do período 1999-2018) (SOLARGIS, 2021) a partir dos limites do município disponibilizados

pelo (IBGE, 2021). O *raster* foi classificado pelo fatiamento da radiação solar por m^2 dia ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$) a partir do método das Quebras Naturais de Jenks, como sugerido por (AZEVEDO, 2016). Assim, há preferência pelos maiores valores de irradiação, ou seja, com os tons mais escuros no mapa.

O fatiamento do critério topográfico foi feito a partir das classes de declividade da (EMBRAPA, 2006), e possibilitou retirar da topografia do município de Pato Branco percentuais claros sobre sua inclinação em relação a sua horizontalidade, obtendo uma escala do mais plano ao mais íngreme. São classificados, assim: plano (0 – 3%), suave ondulado (3 – 8%), ondulado (8 – 20%), forte ondulado (20 – 45%), montanhoso (45 – 75%) e escarpado (>75%).

Partindo da necessidade de se ter um terreno mais plano, que permite leve inclinação para escoamento da água, as classes de declive plano e suave ondulado, como visto no Mapa de Declividade (Figura 4b), são as mais favoráveis para a implementação da usina. A partir disso, é factível concluir que porções muito íngremes não apresentam condições satisfatórias para a implementação de usinas heliotérmicas.

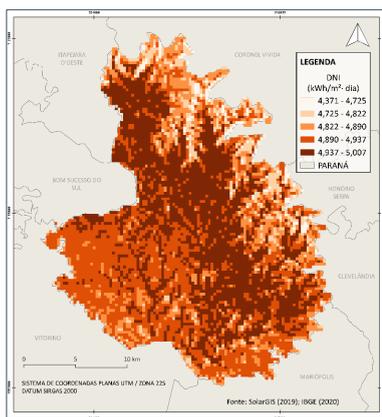
No Mapa de Infraestrutura (Figura 4a), os quatro subcritérios foram julgados segundo a aplicação da distância euclidiana – uma das operações globais da álgebra de mapas –, dentro do limite do município, em relação às linhas de transmissão de energia (ONS), à mancha urbana (IAT), às rodovias (DER) e aos rios (ANA). Esses quatro fatores repercutem na disponibilidade de recursos para a instalação e maior viabilidade econômica de uma usina solar, e por isso, quanto mais distante da mancha urbana e mais próximo às linhas de transmissão de energia, das rodovias e dos rios, mais apta a área é considerada.

A distância euclidiana funciona por meio de uma regra matemática, que opera em ambiente SIG, a partir da menor distância do objeto de interesse em um arquivo matricial. Para isso, as informações em vetor são transformadas para serem submetidas a essa função, o que permite o cálculo matricial da distância. Esse cálculo ocorre a partir da hipotenusa formada pelo centroide da célula origem e o centroide das outras células, de modo sequencial, estendendo-se por toda a delimitação dos elementos. A combinação entre as células gera as distâncias finais (AZEVEDO, 2016), já disponíveis para o fatiamento em classes. De modo igual ao critério climático, o fatiamento se deu pelo método das Quebras Naturais.

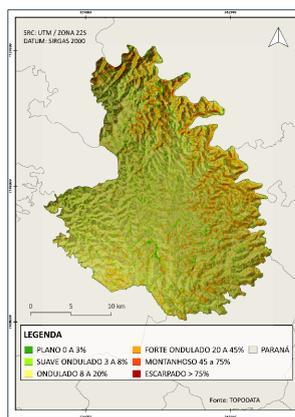
Na Figura 4d, a disposição e influência que cada um dos subcritérios restritivos tem sobre a determinação da aptidão do solo do município pode ser vista de maneira mais clara, por meio da equiparação dos níveis de aptidão agrícola (dados obtidos de MARQUESINE, 2020), do uso do solo (IAT), das APPs (dados da FUNDAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2018) e das ínfimas porções de UCs (dados advindos do CNUC - MINISTÉRIO DO

MEIO AMBIENTE, [s.d.]).

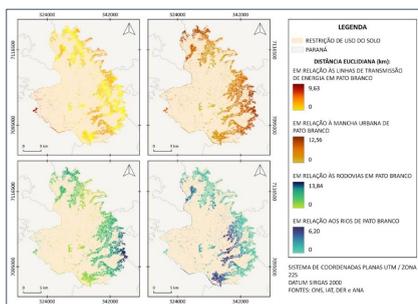
Para fundir todas as informações presentes nos PIs, realizou-se a associação de pesos a cada classe dos subcritérios (Tabela 1) e, através do método AHP, que será apresentado na Seção 2.3, calculou-se o peso relativo de cada subcritério, o que possibilita o uso da álgebra de mapas para indicar o nível de aptidão das áreas disponíveis para a instalação de coletores de energia solar concentrada em Pato Branco – PR.



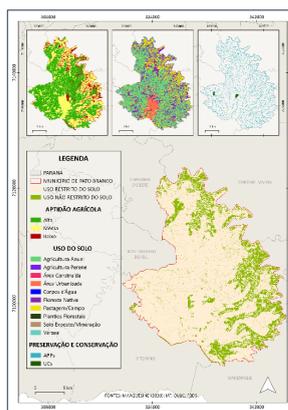
a) Mapa de incidência solar



b) Mapa de declividade



c) Mapa de infraestrutura



d) Mapa restritivo

Figura 4 - Mapas dos critérios climático, topográfico, infraestrutural e restritivo

2.3 Método AHP

O Processo Analítico Hierárquico (AHP) é uma ferramenta matemática desenvolvida por Thomas Saaty na década de 1970 (SAATY, 1977), sendo amplamente utilizada para o estabelecimento de prioridades e tomada de decisão. O método baseia-se na estruturação de um problema em componentes hierárquicos (critérios e subcritérios, etc.), e na comparação pareada entre atributos (SAATY, 2008). Assim, são feitos julgamentos subjetivos entre critérios não-trivialmente comparáveis, baseados em dados empíricos ou opiniões de especialistas (PIMENTA et al., 2019). As comparações são feitas usando a Escala Fundamental de Saaty (EFS), que vai de 1 a 9. Nessa escala, 1 significa que o critério A é igual ao critério B, e 9 denota que A é extremamente mais importante do que B (PIMENTA et al., 2019; SAATY, 1987, 1990, 2008).

Após a construção da matriz de comparações pareadas e da atribuição dos pesos relativos, deve-se verificar se o modelo é consistente. A matriz é normalizada, e calculam-se os autovalores (λ) dessa matriz. Então, calcula-se o Índice de Consistência (IC), uma relação entre o maior autovalor e a ordem da matriz (n) a partir da Equação 1 (SAATY, 1990):

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Finalmente, utiliza-se o IC para calcular a Razão de Consistência (RC) do modelo. Na Equação 2, IR representa o Índice de Consistência Randômico (IR) proposto por Saaty (1987), que depende da ordem da matriz.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

Caso RC exceda 10%, o modelo é considerado inconsistente. No contrário, o modelo apresenta coerência lógica.

Nesse trabalho, utilizou-se o software AHP-OS (GOEPEL, 2018) para efetuar os cálculos de prioridades da análise multicritério. A determinação da hierarquia entre fatores para o cálculo dos pesos está exposta na Tabela 2. Em ordem decrescente, a importância de cada critério é dada por: Radiação Solar Direta Normal (DNI) (42%), Declividade (24%), Distância às Linhas de Transmissão (16%), Distância às Rodovias (7%), Distância aos Recursos Hídricos (7%) e Distância às Áreas Urbanas (4%). A razão de consistência calculada foi de 3,3%, o que caracteriza o modelo como consistente.

Tabela 2 - Matriz de decisão AHP

	Radiação Solar	Declividade	Linhas de Transmissão	Rodovias	Área urbana	Recursos Hídricos
Radiação Solar	1	3	3	5	7	5
Declividade	1/3	1	3	3	5	3
Linhas de Transmissão	1/3	1/3	1	3	4	3
Rodovias	1/5	1/3	1/3	1	2	1
Área urbana	1/7	1/5	1/4	1/2	1	1/2
Recursos Hídricos	1/5	1/3	1/3	1	2	1
Pesos relativos	42%	24%	16%	7%	4%	7%
Autovalor principal	6,210		Razão de consistência	3,3%		

Com os pesos de cada fator determinados, utilizou-se a ferramenta de sobreposição ponderada do ArcGIS Pro para efetuar a álgebra de mapas. Seguindo a metodologia apresentada em 2019 por Doorga et al. (2019), as classes receberam valores de acordo com a EFS (Tabela 1) e os subcritérios receberam os pesos supracitados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da análise ponderada multicritério é um mapa síntese (Figura 5), que foi reclassificado tendo em mente a EFS: considerou-se os valores de 1 a 4 como aptidão baixa; os valores 5 e 6 como aptidão média; e os valores de 7 a 9 como aptidão alta. Os dados quantitativos de cada classe foram calculados e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantificação dos resultados do mapa síntese AHP

Aptidão	Área (km ²)	% em relação	
		à área do município	à área não restrita
Baixa	4,454	0,83%	4,32%
Média	45,184	8,38%	43,78%
Alta	53,572	9,94%	51,91%
SOMA	103,210	19,15%	100,00%

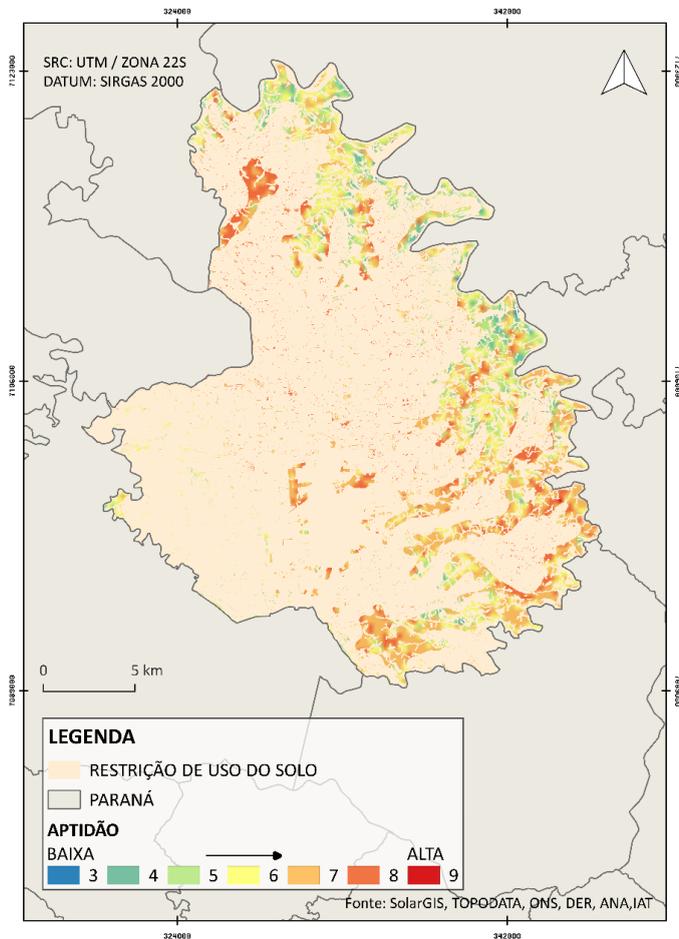


Figura 5 – Mapa de aptidão para a instalação de coletores de energia solar concentrada em Pato Branco – PR

Observando os dados apresentados, é visível que as regiões não restritas encontram-se próximas às regiões limítrofes do município, isto é, mais afastadas da área urbana, que fica no centro-sul. As áreas de aptidão baixa localizam-se fora da zona de DNI mais intensa, que atravessa o município no sentido sudeste-noroeste, e nas áreas mais declivosas que cercam o Rio Chopim. Já as áreas de aptidão média aparecem como uma zona de transição entre locais de baixa aptidão, onde vários critérios não são ideais, e áreas de alta aptidão, onde a maior parte dos critérios apresentam pesos favoráveis.

Como se pode observar, as áreas mais aptas encontram-se nas regiões sudeste e noroeste do município, tendo áreas contíguas de aptidão alta de 2 a 3 km² de extensão. No entanto, essas áreas apresentam formatos irregulares, o que pode ser um empecilho para a instalação de grandes quantidades de coletores de energia solar. Geralmente os conjuntos de espelhos são ordenados em formatos retangulares ou circulares, a fim de minimizar custos de instalação e maximizar o uso efetivo do espaço.

Em áreas da ordem de 2 a 3 quilômetros quadrados, a capacidade nominal de usinas já implantadas ao redor do mundo fica na casa dos 50 a 100 MW. Alguns exemplos são os projetos espanhóis Helios I (50 MW), Helioenergy 1 (50 MW), Aste1A (50 MW); a usina americana Martin Next Generation Solar Energy Center; e o complexo emiradense Shams 1 (NREL, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e).

Tomando a imagem de satélite apresentada na Figura 2, observa-se que as áreas tidas como mais aptas encontram-se em locais onde atualmente se pratica a agropecuária. Além disso, o principal fator de restrição em torno desses agrupamentos de maior aptidão termosolar — tanto na região sudeste, quanto noroeste — é a alta aptidão agrícola. Dessarte, busca-se uma forma de aproveitar ao máximo a geração de energia em coadjuvação com a atividade agropecuária.

Uma das propostas mais difundidas na literatura científica é de usinas de energia solar concentrada integradas a usinas de biomassa. Como parte da infraestrutura pode ser compartilhada entre esses dois tipos de usina, a hibridização entre a CSP e a bioenergia é ideal, o que promove a geração despachada sob demanda, estabilidade da rede, aumento da eficiência, flexibilização, operação nominal mesmo sob condições de baixa radiação (POWELL et al., 2017; SOARES et al., 2018). Além disso, as emissões de gases de efeito estufa diminuem (BANACLOCHE; HERRERA; LECHÓN, 2020; MOHAGHEGH et al., 2021; PRAMANIK; RAVIKRISHNA, 2017), há redução de custos (comparado a usinas de somente CSP) e diminuição da área necessária para construção — comparada a usinas de somente biomassa (BANACLOCHE; HERRERA; LECHÓN, 2020; PRAMANIK; RAVIKRISHNA, 2017).

Atualmente, há apenas uma usina híbrida CSP-biomassa em operação, a Termosolar Borges, na Espanha (COT et al., 2010), e outros protótipos estão em desenvolvimento (MOHAGHEGH et al., 2021).

No Paraná, a bioenergia já foi estudada. Sales et al. (2005) propõem o uso do capim-elefante e da leucena como fonte de biomassa na região. Já Sordi et al. (2015) afirmam que o estado tem potencial técnico e econômico para o uso de resíduos aviários como fonte de biomassa, apresentando uma proposta de instalação em Toledo, com

potencial energético de 50.700 kW, potencial econômico de 8.900 kW, e um custo de produção de eletricidade de R\$ 80,00/MWh. Além disso, há outros estudos que analisam a produção agrícola de biomassa (ANDREA et al., 2014), e o potencial de geração de bioenergia a partir de resíduos urbanos e rurais (FERREIRA et al., 2018). De acordo com Ferreira et al. (2018), o potencial energético do biogás oriundo de dejetos do agronegócio e da vida urbana é de 12.471,4 GWh, o suficiente para prover eletricidade para mais de 4 milhões de pessoas.

A hibridização CSP-bioenergia também é alvo de vários estudos nacionais. Tais estudos afirmam que a hibridização de usinas CSP com biomassa é competitiva, melhora o sistema elétrico nacional, desenvolve a indústria e gera oportunidades de geração de renda e emprego (PEÑAFIEL, 2016). Também destaca-se que tal potencial é grande devido à enorme quantidade de resíduos gerados tanto no setor agrícola, quanto no setor industrial e urbano (FERREIRA et al., 2018). Assim, uma usina híbrida incentiva tanto a sustentabilidade urbana quanto o manejo de resíduos mesmo em lugares onde a DNI é moderada (KAMI, 2019).

Dessa forma, coloca-se como proposta a combinação da radiação solar moderada no município de Pato Branco — quando comparada a áreas de clima árido e semiárido — com as práticas econômicas já vigentes na região para o estabelecimento de uma matriz energética sustentável. Tal esquema, que garante a geração quando a energia solar térmica é insuficiente (HUSSAIN; NORTON; DUFFY, 2017; MOHAGHEGH et al., 2021), é compatível com a escala de áreas tidas como aptas neste trabalho. Uma instalação de no mínimo 50 MWe é recomendada para usinas híbridas, já que o investimento inicial é alto (PRAMANIK; RAVIKRISHNA, 2017). Como já apresentado, há usinas em operação com capacidade nominal de 50 MW, ou mais, em áreas de 2 a 3 km².

4. CONCLUSÕES

Com o aparato das ferramentas dos SIGs utilizados, juntamente com a aplicação dos métodos de processamento de dados, foi possível reunir os PIs – após a imposição da restrição de uso do solo –, com diferentes tipos de informações, em um só resultado: o mapa síntese. Este viabilizou a detecção das áreas mais propícias para a instalação da usina à base de energia solar concentrada, sendo essas majoritariamente próximas aos limites do município, estendendo-se pela extremidade noroeste-sudeste.

A maior parte das áreas em zonas não restritivas apresentou variações de média a alta aptidão para o objetivo do projeto, concentrando resultados mais satisfatórios em uma mancha na região noroeste. Dessa forma, sugere-se a realização de estudos de viabilidade

de econômica e técnica sobre a geração heliotérmica e bioenergética no estado do Paraná, a fim de possibilitar a instalação de uma usina de energia solar concentrada hibridizada com biomassa, aproveitando os recursos disponíveis na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico - SIGEL. Disponível em: <<https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

ANDREA, M. C. S. et al. Energy Demand in Agricultural Biomass Production in Parana state, Brazil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, p. 42–51, 13 maio 2014.

AZEVÊDO, V.; CANDEIAS, A.; TIBA, C. Location Study of Solar Thermal Power Plant in the State of Pernambuco Using Geoprocessing Technologies and Multiple-Criteria Analysis. *Energies*, v. 10, n. 7, p. 1042, 20 jul. 2017.

AZEVÊDO, V. W. B. ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO DE USINA SOLAR TERMOELÉTRICA NO ESTADO DE PERNAMBUCO. Tese de Doutorado—Recife, PE: Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

BANACLOCHE, S.; HERRERA, I.; LECHÓN, Y. Towards energy transition in Tunisia: Sustainability assessment of a hybrid concentrated solar power and biomass plant. *Science of The Total Environment*, v. 744, p. 140729, 20 nov. 2020.

BANCO MUNDIAL. World Bank Global Environment Facility Program: Assessment of the World Bank/GEF Strategy for the Market Development of Concentrating Solar Thermal Power. Washington, DC, USA: The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, 2006. Disponível em: <<https://documents1.worldbank.org/curated/en/615441468197627671/pdf/The-World-Bank-Group-s-partnership-with-the-Global-Environment-Facility-GEF.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2021.

BANCO MUNDIAL. Concentrating Solar Power: Clean Power on Demand 24/7. Washington, DC, USA: World Bank, 2021.

BURROUGH, P.; MCDONNELL, R. Principle of Geographic Information Systems. 1 jan. 1998.

CASA CIVIL - PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. 12.651. LEI No 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012. . 25 maio 2012.

CATÁLOGO DE METADADOS DA ANA. Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2013. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/7bb15389-1016-4d5b-9480-5f1acdadd0f5>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

COT, A. et al. TERMOSOLAR BORGES: A THERMOSOLAR HYBRID PLANT WITH BIOMASS. . In: PROCEEDINGS VENICE 2010, THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY FROM BIOMASS AND WASTE. Environmental Sanitary Engineering Centre, Venice, Italy: CISA, 2010.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO PARANÁ. Mapas Rodoviários. Disponível em: <<http://www.der.pr.gov.br/Pagina/Mapas-Rodoviarrios>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

DLR. Solar thermal power plants: Heat, electricity and fuels from concentrated solar power. Colônia, Alemanha: German Aerospace Center (DLR) Institute of Solar Research, maio 2021. Disponível em: <https://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/Study_Solar_thermal_power_plants_DLR_2021-05.pdf>. Acesso em: 21 set. 2021.

EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). ArcGIS Pro. Redlands, CA: ESRI, 2021.

FEPESE. ESTUDO DE IMPACTO DE VIZINHANÇA (EIV) DO TERMINAL URBANO DE PATO BRANCO/PR. Pato Branco - PR: FUNDAÇÃO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOCIOECONÔMICOS - FEPESE, fev. 2020. Disponível em: <http://patobranco.pr.gov.br/wp-content/uploads/2020/02/00.-EIV_TU_Pato-Branco_Levantamento-e-diagn%C3%B3stico_Volume-I_vers%C3%A3o-digital.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2021.

FERREIRA, L. R. A. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 94, p. 440–455, 1 out. 2018.

FISCHER, M.; SCHOLTEN, H. J.; UNWIN, D. (EDS.). Spatial Analytical Perspectives on GIS. London: Routledge, 2019.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. APP - Pato Branco, PR. Disponível em: <http://geo.fbds.org.br/PR/PATO_BRANCO/APP/>. Acesso em: 22 jun. 2021.

GOEPEL, K. D. Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, v. 10, n. 3, 6 dez. 2018.

HUSSAIN, C. M. I.; NORTON, B.; DUFFY, A. Technological assessment of different solar-biomass systems for hybrid power generation in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 1115–1129, 1 fev. 2017.

IBGE. Pato Branco - Panorama. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/pato-branco/panorama>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

ILBAHAR, E.; CEBI, S.; KAHRAMAN, C. A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making. *Energy Strategy Reviews*, v. 25, p. 18–33, 1 ago. 2019.

INSTITUTO DE ÁGUA E TERRA. Mapas e Dados Espaciais. Disponível em: <<http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapas-e-Dados-Espaciais>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. Key World Energy Statistics 2020. Paris, França: IEA, ago. 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020#>>.

IPCC. Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [s.l.: s.n.]. v. 49

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. London, UK: Cambridge University Press, 2021.

IRENA. Levelized cost of energy by technology, World. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/levelized-cost-of-energy>>. Acesso em: 21 set. 2021.

KAMI, E. C. A. ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE SISTEMA HÍBRIDO SOLAR TÉRMICO INTEGRADO À UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. Dissertação de Mestrado—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

LINDBERG, O. et al. PV park site selection for utility-scale solar guides combining GIS and power flow analysis: A case study on a Swedish municipality. *Applied Energy*, v. 282, p. 116086, 15 jan. 2021.

MANN, C. C. The wizard and the prophet: two remarkable scientists and their dueling visions to shape tomorrow's world. First edition ed. New York: Alfred A. Knopf, 2018.

MARQUESINE, M. F. Mapa de aptidão agrícola de Pato Branco. Pato Branco, Paraná, 2020. Resolução espacial: 85m. No prelo.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC). Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs.html>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

MOHAGHEGH, M. R. et al. Latest advances on hybrid solar–biomass power plants. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, p. 1–24, 19 mar. 2021.

NREL. Shams 1. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/shams-1>>. Acesso em: 31 out. 2021a.

NREL. Martin Next Generation Solar Energy Center. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/martin-next-generation-solar-energy-center>>. Acesso em: 31 out. 2021b.

NREL. Aste 1A. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/aste-1a>>. Acesso em: 31 out. 2021c.

NREL. Helios I. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/helios-i>>. Acesso em: 31 out. 2021d.

NREL. Helioenergy 1. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/project/helioenergy-1>>. Acesso em: 31 out. 2021e.

PEÑAFIEL, R. A. S. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA FORMULAÇÃO DE POLÍTICA PARA O DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA HELIOTÉRMICA NO BRASIL. Doutorado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

PIMENTA, L. B. et al. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. *Interações (Campo Grande)*, v. 20, p. 407–420, 8 ago. 2019.

POWELL, K. M. et al. Hybrid concentrated solar thermal power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 215–237, 1 dez. 2017.

PRAMANIK, S.; RAVIKRISHNA, R. V. A review of concentrated solar power hybrid technologies. *Applied Thermal Engineering*, v. 127, p. 602–637, 25 dez. 2017.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS3.18.2 with GRASS 7.8.5. [s.l.] QGIS Association, 2021.

REN21. Renewables 2021: Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat: Renewables Now, 2021.

RODRIGUES, S.; COELHO, M. B.; CABRAL, P. Suitability Analysis of Solar Photovoltaic farms: A Portuguese Case Study. *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, v. 7, n. 1, p. 12, 2017.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process— what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, v. 9, n. 3, p. 161–176, 1 jan. 1987.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1 jun. 1977.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research, Decision making by the analytic hierarchy process: Theory and applications*. v. 48, n. 1, p. 9–26, 5 set. 1990.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.

SALES, F. A. et al. Biomass of elephant grass and leucaena for bio-energy production. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 36, n. 6, p. 3567, 9 dez. 2015.

SECRETARIA NACIONAL DE ASSISTÊNCIA SOCIAL - SNAS. SUAS 10. Diversidade no SUAS: realidade, respostas, perspectivas. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome, 2015. Disponível em: <https://amures.org.br/uploads/1521/arquivos/1713549_Suas10Anos_2015.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2021.

SOARES, J. et al. Evaluation of the performance of hybrid CSP/bio-mass power plants. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 13, n. 4, p. 380–387, 1 dez. 2018.

SOLARGIS. Tech Specs - Solar data behind the maps. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/tech-specs>>. Acesso em: 23 jun. 2021.

SORDI, A.; SOUZA, S. N. M. DE; OLIVEIRA, F. H. DE. Biomassa gerada a partir da produção avícola na região Oeste do Estado do Paraná: uma fonte de energia. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 27, n. 2, p. 183–190, 2005.

VALERIANO, M. DE M. TOPODATA: GUIA PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS GEOMORFOLÓGICOS LOCAIS INPE, , 2008. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2021.