

Estimativas de geração fotovoltaica na Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH/USP) em Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

SANDRO DE SENA MACHADO
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

ANDRÉ FELIPE SIMÕES

Introdução

Para estimar a geração fotovoltaica de uma localidade, pode-se utilizar de modelos de irradiação solar em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Em ambiente SIG, pode-se utilizar de Modelos Digitais de Superfície (MDS), que permitem análises da irradiação solar, inclinação e orientação da superfície, bem como o sombreamento sobre a área de estudo, auxiliando no planejamento e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, identificando os locais mais adequados para geração (CRUZ, 2017).

Problema de Pesquisa e Objetivo

Considera-se que o modelo Brasil-SR foi hospedado na plataforma SunData 3.0, é de extrema valia para a sociedade. Todavia, Franco & Pinheiro (2020) apontam ressalvas na utilização desses dados, pois apesar da robustez do modelo climatológico Brasil-SR que opera dentro da plataforma, a utilização dos dados tal como estão, pode ocasionar erros nas estimativas do potencial de geração de energia por usinas fotovoltaicas em áreas urbanas com relevante ocupação vegetal, topografia acidentada ou qualquer outro obstáculo que possa gerar sombras.

Fundamentação Teórica

A fonte de energia fotovoltaica destaca como alternativa às necessidades de mudanças na matriz energética mundial, visto que esta tecnologia permite aliar a preservação do meio ambiente ao desenvolvimento socioeconômico. Pode-se considerar que um modelo de irradiação solar aplicável que busca auxiliar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, deve contemplar fatores como: latitude; elevação; orientação da superfície do telhado; sombras projetadas pela topografia ao redor, variação diária e sazonal do trajeto do sol e as atenuações atmosféricas (NERO, et al. 2020).

Metodologia

Para estimar o potencial de geração fotovoltaico na EACH-USP, utilizou-se de dados sobre a superfície da área de estudo a partir dos MDS disponíveis no Geosampa, que posteriormente foram tratados e analisados no ambiente do ArcGIS Pro. Nesse ambiente foram aplicados algoritmos de geoprocessamento que permitiram: extrair as pegadas das edificações; estimar a irradiação solar média anual nos telhados; identificar os telhados adequados para instalação de sistemas fotovoltaicos e estimar a geração fotovoltaica nos telhados selecionados.

Análise dos Resultados

Tendo em vista que o campus da EACH-USP consumiu aproximadamente 1.269,5 MWh ao longo do ano de 2019, as estimativas de geração fotovoltaica no campus indicam que se caso todas as edificações selecionadas recebessem sistemas fotovoltaicos, os sistemas seriam conectados à rede (on-grid), suprimindo parcialmente a demanda da universidade em aproximadamente 0,14 %, já que as estimativas determinaram uma geração de aproximadamente 1,8 MWh ao longo do ano. O mapa do potencial de geração fotovoltaica por edifício indica as edificações que possuem maior capacidade de geração.

Conclusão

Este trabalho demonstrou que a metodologia proposta possui compatibilidade com o desenvolvimento de cidades inteligentes, sendo capaz de realizar simulações de irradiação de energia fotovoltaica em um nível de escala detalhado, a partir de modelos oriundos de LiDAR. O estudo também demonstrou que a análise espacial deve ser executada de maneira sistêmica, de modo a integrar os elementos da superfície para melhores resultados. Os modelos de irradiação elaborados em SIG são considerados ferramentas úteis para gestão e planejamento de sistemas fotovoltaicos, auxiliando as tomadas de decisões.

Referências Bibliográficas

CRUZ, F. Metodologia de análise do potencial solar e eólico na zona urbana apoiado em geoprocessamento – Caso USP Campus Butantã. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2017. FRANCO, G. & PINHEIRO, R. Estudo comparativo das estimativas de energia fotovoltaica gerada sobre superfícies tridimensionais em ambiente SIG e das informadas pela plataforma Sundata. Brazilian Journal of Development. Curitiba, v. 6, n.12. 2020. ISSN 2525-8761.

Palavras Chave

energia, fotovoltaico, geoprocessamento

Estimativas de geração fotovoltaica na Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH/USP) em Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

1. Introdução

A transição energética tem sido considerada pela comunidade científica como uma das mais relevantes estratégias de mitigação das mudanças climáticas, sendo uma das principais formas de alcançar as metas estipuladas pelo Acordo de Paris sobre o clima, as quais visam manter o aumento das temperaturas globais no limite de 2°C. Nesse contexto, considera-se que a geração distribuída de energia elétrica fotovoltaica é uma das principais soluções para atingir as metas de redução de gases de efeito estufa, em função de sua tecnologia de baixo carbono e da possibilidade de sua geração ser próxima ao ponto de consumo (IEA, 2021; IRENA, 2022; ONU, 2015).

Portanto, é evidente a importância de estudos que promovam o desenvolvimento de aplicações de fontes renováveis de energia, especialmente de energia solar fotovoltaica, que é acessível e pode ser mais eficiente em relação a outras fontes, dado o potencial de geração, transmissão e distribuição dessa fonte (ABES, 2017). Além disso, considera-se que a energia solar pode ser relativamente menos poluente que outras fontes, e ainda possibilitar a redução de assimetrias sociais e econômicas (SILVA, *et al.* 2018; OLIVEIRA, *et al.* 2018).

Para estimar a geração fotovoltaica de uma localidade, pode-se utilizar de modelos de irradiação solar em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Estes permitem integrar os componentes que determinam a variabilidade espacial e temporal da energia fotovoltaica. Em ambiente SIG, pode-se utilizar de Modelos Digitais de Superfície (MDS), que permitem análises da irradiação solar, inclinação e orientação da superfície, bem como o sombreamento sobre a área de estudo, auxiliando no planejamento e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, identificando os locais mais adequados para geração (CRUZ, 2017).

Considerando a importância dos centros universitários como referências para o desenvolvimento sustentável, optou-se pela seleção de uma área de estudo em um campus universitário na região metropolitana de São Paulo. Sob tais considerações, neste trabalho, optou-se pela elaboração de estimativas de geração fotovoltaica na Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH/USP) localizado na Zona Leste da cidade de São Paulo.

Para estimar o potencial de geração fotovoltaico na EACH-USP, utilizou-se de dados sobre a superfície da área de estudo a partir dos MDS disponíveis no Geosampa (PRODAM, 2020), que posteriormente foram tratados e analisados no ambiente do ArcGIS Pro. Nesse ambiente foram aplicados algoritmos de geoprocessamento que permitiram: extrair as pegadas das edificações; estimar a irradiação solar média anual nos telhados; identificar os telhados adequados para instalação de sistemas fotovoltaicos e estimar a geração fotovoltaica nos telhados selecionados.

A partir dos resultados obtidos, realizou-se uma discussão acerca das aplicações que a metodologia adotada propicia no desenvolvimento de soluções fotovoltaicas. Dessa forma, considerou-se a caracterização da área de estudo e, concomitantemente, discorreu-se sobre os aspectos ambientais, técnicos, econômicos e sociais da geração fotovoltaica, para discutir sobre o potencial e viabilidade de sistemas fotovoltaicos na EACH/USP.

2. Problema de Pesquisa e Objetivos

2.1. Problema de pesquisa

Em função das demandas por dados de irradiação solar, atualmente no Brasil existem modelos numéricos operacionais otimizados para avaliação da irradiação solar na superfície, entre os quais se destaca o modelo BRASIL-SR. Este foi validado e desenvolvido pela cooperação entre o Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia

(LABREN), o Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), além da parceria com universidades públicas (ABES, 2017).

Além disso, o modelo Brasil-SR foi hospedado na plataforma SunData 3.0, onde é apresentado através de interface visual composta por gráficos e tabelas, contendo as médias mensais e anuais do ponto consultado (ABES, 2017).

O SunData 3.0, é uma plataforma hospedada na web de livre acesso, desenvolvido pelo Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), que apresenta a Irradiação Diária Média (kWh/m².dia) a partir da inserção pontual de latitude e longitude, em determinadas localidades para todos os meses do ano para três diferentes ângulos de inclinação em relação ao plano horizontal (CRESESB, 2018).

Assim, considera-se que o Sundata é uma ferramenta gratuita de extrema valia para a sociedade. Todavia, Franco & Pinheiro (2020) apontam ressalvas na utilização desses dados, pois apesar da robustez do modelo climatológico Brasil-SR que opera dentro da plataforma, a utilização dos dados tal como estão, pode ocasionar erros nas estimativas do potencial de geração de energia por usinas fotovoltaicas em áreas urbanas com relevante ocupação vegetal, topografia acidentada ou qualquer outro obstáculo que possa gerar sombras.

No mesmo estudo de Franco & Pinheiro (2020), foi demonstrado que a maioria das observações resultaram em diferenças significativas entre o modelo do Sundata e um modelo elaborado no ArcGIS Pro. Isso ocorreu porque o modelo Brasil-SR não considera os obstáculos contidos ao redor do local escolhido para instalação de painéis solares, e que podem prejudicar a captação de energia solar através de sombreamento.

Considerando que existem locais mais aptos à instalação de sistemas fotovoltaicos, devido à projeção de sombras pelo entorno, tem-se que, utilizando um Modelo Digital de Superfície (MDS) do entorno e da edificação em análise, é possível determinar as variáveis necessárias para a modelagem da incidência de irradiação solar (NERO, *et al.* 2020; FRANCO, & PINHEIRO, 2020).

Os MDS são utilizados para computar a elevação, inclinação e orientação das superfícies, bem como os sombreamentos causados por prédios, árvores e estruturas físicas capazes de bloquear os raios solares. Além disso, também são consideradas as distâncias e ângulos solares nas soluções das equações dos modelos. Portanto, pode-se utilizar de SIG no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para determinar a irradiação solar, orientação, inclinação e sombreamento sobre os módulos fotovoltaicos (NERO, *et al.* 2020).

Assim, pode-se criar modelos que estimem a geração fotovoltaica em função dessas variáveis. Dessa forma, se faz necessário realizar simulações da irradiação solar sobre o plano do módulo fotovoltaico, bem como do sombreamento derivado dos ciclos diários e anuais do planeta, dos objetos adjacentes aos módulos, e dos módulos entre si (MOREIRA, *et al.* 2018).

2.2. Objetivos

Pretende-se avaliar o potencial de geração fotovoltaica no campus da Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo. Para isso, é necessário realizar objetivos específicos, os quais são:

- I. Elaborar um modelo de irradiação solar para as edificações da Escola de Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo.
- II. Estimar a geração de energia elétrica fotovoltaica a partir do modelo de irradiação solar elaborado.
- III. Discutir as aplicações práticas que a modelagem da irradiação solar pode explorar no planejamento de sistemas fotovoltaicos em função de aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais.

3. Fundamentação teórica

3.1. Contexto socioambiental

Devido aos efeitos das mudanças climáticas, a geração de energia tornou-se uma questão urgente, pois esta é uma das principais causas do agravamento do efeito estufa, visto que a matriz energética mundial depende, majoritariamente, de combustíveis fósseis, principalmente derivados de petróleo, carvão e gás natural, os quais são não renováveis e reconhecidos pelo seu potencial poluidor (IEA, 2021).

Tal questão tem, gradativamente, provocado mudanças na matriz energética mundial, através da inovação e o desenvolvimento de tecnologias aplicáveis às energias renováveis. Assim, busca-se a descarbonização das matrizes energéticas e, concomitantemente, ainda alcançar incrementos de eficiência produtiva, além de induzir a mitigação de impactos ambientais negativos e contribuir para a redução de assimetrias sociais e econômicas (FONTES, 2012).

Destarte, deve-se considerar e ponderar diversos aspectos, positivos e negativos, comparativamente entre as alternativas de energias renováveis, avaliando a viabilidade e potencialidade dessas para que as tomadas de decisões acerca de alocação de recursos para a geração, transmissão e distribuição de energia, sejam assertivas e precisas (FONTES, 2012; SILVA, *et al.* 2018).

Nesse sentido, a energia solar é apresentada como a melhor alternativa de mitigação às mudanças climáticas em relação ao seu custo e potencial para o ano de 2030. Também foi demonstrado que a energia solar se caracteriza como uma das melhores alternativas de mitigação às mudanças climáticas, tendo em vista fatores geofísicos, ambientais-ecológicos, tecnológicos, econômicos, socioculturais e institucionais, que podem limitar ou facilitar a implantação de opções de resposta às mudanças do clima (IPCC, 2022).

De acordo com a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA na sigla em inglês), considera-se que a utilização de energia solar constitui uma parte vital da transição energética global, pois esta permitirá, a redução de aproximadamente 21% das emissões de CO₂ até 2050, além de suprir aproximadamente um quarto da demanda por eletricidade e ainda gerar benefícios socioeconômicos, tal como empregar 18 milhões de pessoas durante estas 2-3 primeiras décadas do corrente século XXI. Segundo a IRENA (2022), estimativas de geração de emprego por tecnologia de energia renovável apontam que a energia solar fotovoltaica foi a energia que mais gerou empregos em 2020. Além disso, essa tecnologia apresentou um crescimento exponencial em geração elétrica mundialmente desde 2010, demonstrando uma tendência para o futuro.

Neste contexto, a energia fotovoltaica, se apresenta como fonte de energia renovável alternativas prioritárias, tendo em vista o potencial de acessibilidade, eficiência e impactos ambientais reduzidos, comparativamente a outras fontes de energias hidrelétricas, térmicas, eólicas e derivadas de biomassa (SILVA, *et al.* 2018; OLIVEIRA, *et al.* 2018).

3.2. Área de estudo

De acordo com a Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano da cidade de São Paulo, esta foi a primeira cidade da América do Sul a disponibilizar, de forma livre, os dados LiDAR de todo seu território. Os dados foram obtidos por meio de aerolevanteamento realizado entre maio e julho de 2017 pelas secretarias municipais de Desenvolvimento Urbano, Fazenda e Verde e Meio Ambiente, que disponibilizaram os dados no Geosampa, portal coordenado pela Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento que segue as diretrizes do Plano Diretor Estratégico (PRODAM, 2020).

Assim, considerando a questão de escala espacial para estimar o potencial de geração fotovoltaica, e a importância das universidades como centros de referência, optou-se pelo desenvolvimento de estimativas de geração fotovoltaica num campus universitário, visando contribuir para o seu planejamento energético. Esta temática também já foi abordada na

literatura por autores como Santiago *et al.* (2016), os quais desenvolveram um projeto de instalação de sistemas fotovoltaicos no campus universitário João Pinheiro II do Centro Universitário UNA; Nero *et al.* (2020) que abordou uma metodologia técnica para construir um modelo de radiação solar incidente em prédios da EE-IGC-UFMG; entre outros autores como Cruz (2019), Moreira *et al.* (2018) que utilizaram SIG.

A EACH/USP está localizada na Região Metropolitana de São Paulo, no bairro de Vila Guaraciaba, em terreno cedido pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) com área de 1.240.578,00 m², integrante do conjunto pertencente ao Parque Ecológico do Tietê (Decreto Estadual no. 7.868/76). À noroeste da unidade estão o Parque Ecológico do Tietê, a rodovia Ayrton Senna, a avenida Assis Ribeiro e o aeroporto de Guarulhos, e ao sul as linhas de trem Safira e Esmeralda da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM).

Portanto, trata-se de uma área ambientalmente relevante, pois o campus está sobre uma Área de Preservação Permanente, inserida na Área de Proteção Ambiental Várzea do Rio Tietê (Lei Estadual no. 5.598/87 e Decreto Estadual no. 42.837/98). O Anuário Estatístico de 2019 das unidades USP apresenta indicadores que caracterizam a EACH, e apontam a área total edificada em aproximadamente 44.579 m², recebendo, diariamente, em torno de 6.139 pessoas, entre alunos, professores e funcionários (PUSP-C, 2021).

De acordo com o Informe Mensal de Energia de dezembro de 2019 da USP, o custo total (R\$) do consumo de energia elétrica na EACH no ano de 2019 foi de 812.600,00 R\$. Já quanto ao consumo de energia elétrica, observa-se que o citado Anuário, que registra as maiores taxas de consumo no primeiro semestre, com máxima de 117,7 MWh em Abril e Maio, e mínima de 86,6 MWh em Julho, com um total de 1.269,5 MWh ao longo do ano de 2019 (PUSP-C, 2021).

3.3. Matriz energética

Frente ao cenário de mudanças climáticas e a necessidade de transição energética, diversificar a matriz e reduzir as emissões de carbono se tornou urgente para adquirir maior capacidade de resiliência e adaptação aos riscos e incertezas do futuro (IPCC, 2022). A perspectiva global sobre eficiência energética e empregos avalia que estímulos às energias renováveis, principalmente eólica e solar fotovoltaica, oferecem oportunidades para alinhar recuperação econômica e social com uma estratégia energética sustentável (IEA, 2021).

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (PDEE, 2020), os principais desafios socioambientais estratégicos da matriz são definidos basicamente em três temas centrais: compatibilização da geração e transmissão de energia com a conservação da biodiversidade; compatibilização da geração de energia com o uso da água e gestão das emissões de Gases do Efeito Estufa associados à geração e ao consumo de energia.

De acordo com o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional de 2021 (BEN/EPE, 2021), 65,2 % da geração de energia elétrica no Brasil é proveniente da hidroeletricidade, fonte considerada renovável, contudo enfrenta críticas da sociedade por seus impactos ecossistêmicos, sociais e econômicos negativos, particularmente na etapa de construção de novas usinas hidrelétricas (SILVA, *et al.* 2018).

Do ponto de vista de segurança energética, a dependência da matriz elétrica por hidrelétricas implica em riscos. Assim, observa-se que a matriz elétrica brasileira também está vulnerável às mudanças do clima, tendo em vista que efeitos como o aumento da frequência e intensidade de períodos de estiagem afetam hidroelétricas. (BURNQUIST, 2021).

Dessa forma, efeitos da gestão inadequada dos recursos, sinergicamente às mudanças do clima estão ocasionando a diminuição da oferta por hidrelétricas e elevação dos custos de energia (GALVÃO, & BERMANN, 2015; BPBES, 2019).

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (ABES), a Região Sudeste do Brasil apresenta competitividade para instalação de empreendimentos fotovoltaicos centralizados e distribuídos por três motivos principais: (i) as distâncias aos grandes centros

de consumo são menores, (ii) a grande concentração de carga do SIN ocorre nesta região e (iii) maior disponibilidade de pontos de conexão à rede sem necessidade de novas linhas de transmissão.

Dados de 2021 da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), indicam que a geração de energia fotovoltaica no cenário nacional (centralizada e distribuída) alcançou patamares de: mais de 10,4 GigaWatts (GW) operacionais; mais de R\$ 54,1 bilhões em novos investimentos privados; mais de 312 mil novos empregos gerados; mais de 14,6 bilhões em arrecadação de tributo; mais de 11,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) evitadas.

Considerando estes fatores, a fonte de energia fotovoltaica a partir de sistemas de geração centralizada ou distribuída, se destaca como alternativa às necessidades de mudanças na matriz energética mundial, visto que esta tecnologia permite aliar a preservação do meio ambiente ao desenvolvimento socioeconômico (OLIVEIRA, 2018).

3.4. Energia fotovoltaica

Segundo Santiago *et al.* (2016), os sistemas de geração de energia fotovoltaica, apresentam basicamente duas configurações distintas: sistemas isolados ou autônomos e conectados à rede elétrica. Os sistemas conectados à rede elétrica atuam como usinas geradoras de energia em paralelo às grandes centrais. Esses sistemas, podem ser integrados às edificações, estradas, entre outros, e, portanto, próximas ao ponto de consumo (geração distribuída); ou do tipo central (geração centralizada), mais distante do ponto de consumo.

Considera-se que uma das vantagens da geração distribuída, se dá em função da proximidade ao ponto de consumo, fator que diminui perdas e custos relacionados a transmissão e distribuição da energia elétrica. Portanto, a microgeração (até 75 kW) e a minigeração (acima de 75 kW até 5 MW) fotovoltaica conectada à rede, se apresenta como uma alternativa com alto potencial, eficiência e viabilidade em áreas urbanas, considerando que esta forma de geração é modular e está tipicamente integrada a telhados e coberturas das edificações, estimulando uma geração descentralizada e próxima ao ponto de consumo,, injetando na rede elétrica o excedente de energia gerado (ABSOLAR, 2021; ABES, 2017).

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2019) também destacou critérios para a avaliação de projetos geração fotovoltaica como: a confiabilidade dos dados de irradiação solar global horizontal, no plano horizontal e no plano inclinado por metro quadrado; a configuração do sistema fotovoltaico (capacidade de geração, ângulos de orientação e inclinação, componentes) além de perdas consideradas na previsão de capacidade de geração (incertezas, razão de performance e fator de capacidade).

Outrossim, para determinar o potencial de geração de energia elétrica, deve-se considerar não apenas a radiação solar disponível, mas também a eficiência dos painéis solares e a taxa de desempenho do sistema fotovoltaico. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) fornece uma estimativa conservadora de 15% de eficiência e 86% de taxa de desempenho. Esses valores significam que os painéis solares são capazes de converter 15% da energia solar recebida em eletricidade e, em seguida, 86% dessa eletricidade é preservada à medida que passa pela instalação (KHANNA, 2022).

3.5. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Pode-se considerar que um modelo de irradiação solar aplicável que busca auxiliar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, deve contemplar fatores como: latitude; elevação; orientação da superfície do telhado; sombras projetadas pela topografia ao redor, variação diária e sazonal do trajeto do sol e as atenuações atmosféricas (MOREIRA, *et al.* 2018; NERO, *et al.* 2020).

As ferramentas de SIG geralmente utilizadas em análises da irradiação solar são o conjunto de ferramentas Solar Analyst do ArcGIS e o r.sun do GRASS que pode ser utilizado no QGIS. Ambas ferramentas podem utilizar Modelos Digitais de Superfície (MDS) através

de arquivos digitais matriciais que representam os valores da altitude, podendo ser posteriormente processados nos cálculos da irradiação solar em uma determinada superfície (NERO, *et al.* 2020; FRANCO, & PINHEIRO, 2020).

No ArcGIS Pro, pode-se utilizar ferramentas que permitem estimar a irradiação solar para certas localizações ou para áreas geográficas inteiras, como a ferramenta *Area Solar Radiation*. Os parâmetros principais da ferramenta *Area Solar Radiation* são: latitude, resolução do *skysize*, intervalos de dia e hora, configuração de tempo, declividade e orientação, número de direções de cálculo, intervalos do ângulo zênite e azimute, e coeficientes de difusão e transmissividade (ESRI Inc. 2022).

Essa ferramenta faz parte da extensão ArcGIS *Spatial Analyst* e recebe um MDS como dado de entrada, fornecendo informações para calcular a irradiação solar com base em um modelo que considera a posição do sol ao longo do ano e em diferentes momentos do dia, a inclinação e orientação da superfície, bem como obstáculos que podem bloquear a luz. A saída do processamento, é uma camada raster onde cada valor de célula é a quantidade de radiação solar em watt-hora por metro quadrado (Wh/m²) no local (ESRI Inc. 2022).

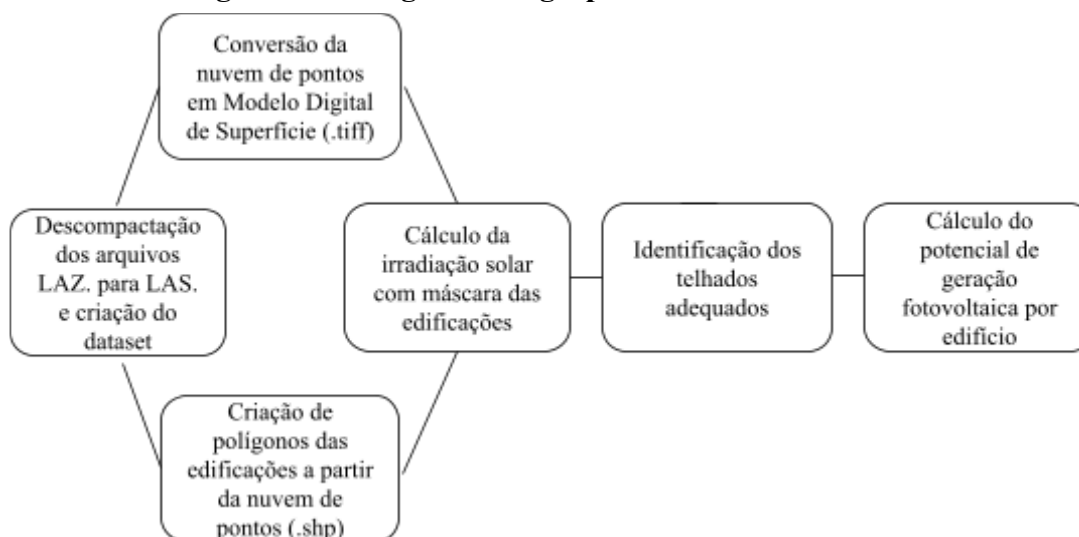
Nero *et al.* (2020) adotaram valores padrões do algoritmo *Area Solar Radiation*, exceto pela resolução do *skysize*, que foi aumentada para 512 x 512 para aprimorar o cálculo de sombreamento no Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

A cartografia 3D a partir de MDS da cidade de São Paulo está disponível no Portal GeoSampa, possibilitando o levantamento da irradiação solar na área de estudo com mais acurácia, considerando aspectos da superfície no modelo. Os arquivos estão disponíveis para download – em formato LAZ (LAS compactado), tendo precisão na ordem de 10 cm (1:1000) e densidade média de 10 pontos/m². Os arquivos de nuvem de pontos, formam o Modelo Digital de Superfície (MDS), classificados em 5 categorias: Solo, Edificação, Vegetação, Obras viárias e Outras feições. O sistema de projeção e datum do arquivo é SIRGAS2000 / UTM zone 23S (EPSG:31983) (PRODAM, 2020).

3.6. Geoprocessamento dos dados

Em síntese, o processamento dos dados foi esquematizado no fluxograma apresentado na figura 1.

Figura 1: Fluxograma do geoprocessamento de dados



Utilizou-se neste trabalho, as ortofotos RGB de 2017, para fins de visualização, e os MDS das faixas de voo 3446-432, 3445-434, 4435-313, 4435-311, que contém a área total da EACH-USP, todas disponíveis no portal GeoSampa numa resolução de 1:1000. Primeiramente, foram gerados quatro arquivos de nuvem de pontos em três dimensões com extensão .LAS, convertidos a partir dos MDS de 2017 em formato .LAZ. A partir disso,

criou-se um *dataset* composto pelos quatro arquivos, para integrar o conjunto de dados das diferentes faixas de voo.

A partir do MDS, realizou-se um tratamento no software ArcGIS Pro, adaptando as metodologias apresentadas por Weitz *et al.* (2021) e Khanna (2022), para a área de estudo. Neste contexto, as etapas seguintes do processamento dos dados consistem em criar camadas vetoriais dos edifícios em três dimensões e camadas matriciais da superfície para calcular a irradiação solar; converter as unidades de medida, simbolizar as camadas para fins de visualização, identificar os telhados adequados para sistemas fotovoltaicos e, por fim, calcular estimativas de geração de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos acoplados às edificações adequadas.

Dessa forma, no ambiente do ArcGIS Pro, foi selecionada a nuvem de pontos LAS do MDS classificada como *Buildings* para extrair as pegadas das edificações através da ferramenta LAS Point Statistics As Raster, gerando dados matriciais das edificações (rasters). Em seguida, foram gerados polígonos (vetores) onde a raster mostra a presença dos edifícios utilizando a ferramenta *Raster to Polygon*. Os polígonos foram melhorados com a ferramenta *Regularize Building Footprint* e também com alguns ajustes manuais dos vértices, buscando correspondência com as Ortofotos RGB de 2017. Posteriormente, foram selecionados os polígonos dos edifícios da EACH-USP através da tabela de atributos (WEITZ, 2021).

A partir do MDS original da área de estudo, foi gerado um MDS rasterizado, convertidos a partir da ferramenta LAS dataset to raster. Estes processos foram realizados para que, na etapa posterior, a função de cálculo de irradiação ocorra somente na área edificada, mas que ainda assim admita os obstáculos físicos encontrados na superfície.

Em seguida, foi executado o algoritmo *Area Solar Radiation*, que calculou o total de irradiação global sobre as superfícies dos edifícios para o ano de 2021. Esse algoritmo permite criar um conjunto de vistas para o céu por meio dos cálculos dos máximos ângulos horizontais de obstrução, causados pela topografia e estruturas próximas (ESRI, Inc, 2022).

Os ângulos são convertidos para um arquivo matricial indicando a visão atmosférica para cada célula do MDS, denominado *viewshed*. Posteriormente, realiza-se a sobreposição com o mapa solar (*sunmap*), que apresenta a posição do Sol ao longo do tempo, e o mapa do céu (*skymap*), que contém os dados de origem da radiação difusa. Durante esse processo, o algoritmo computa a radiação direta considerando se o Sol é visível em um local e tempo específico, e, simultaneamente, a origem da radiação difusa. Os resultados dessas operações são obtidos nos arquivos matriciais de irradiação solar, que representam a irradiância na superfície (W/m^2) (ESRI Inc. 2022).

Posteriormente, foram aplicados algoritmos que permitem analisar a aptidão dos topos dos edifícios para receber painéis solares em função de condições estabelecidas como critérios. Para identificar telhados mais adequados para painéis solares, considera-se quatro critérios: (1) os telhados adequados devem ter uma inclinação de 45 graus ou menos, pois encostas íngremes tendem a receber menos luz solar. Para determinar a inclinação do telhado, cria-se uma camada raster de inclinação; (2) os telhados adequados devem receber pelo menos 800 kWh/m² de irradiação solar. Pode-se avaliar este critério usando a camada raster de irradiação solar; (3) os telhados adequados devem estar voltados para o norte, pois os telhados voltados para o norte no hemisfério Sul recebem mais luz solar. Para determinar a orientação do telhado, cria-se uma camada raster de orientação. (4) considera-se que uma área menor que 30 metros quadrados de superfície adequada, não está apta para receber os painéis fotovoltaicos (KHANNA, 2022).

Assim, foram geradas camadas matriciais de inclinação e orientação da superfície a partir do MDS. Em seguida, foram removidas áreas da camada raster de irradiação solar que tinham uma inclinação superior a 45 graus, utilizando a máscara das pegadas das edificações no cálculo. Dessa forma, utilizou-se de uma expressão na ferramenta *Con* que verifica se cada

valor de inclinação é menor ou igual a 45. O resultado é uma camada raster de irradiação solar que não inclui inclinações maiores que 45 graus (KHANNA, 2022).

Considerando que as superfícies dos telhados devem receber pelo menos 800 kWh/m² de irradiação solar, utiliza-se a ferramenta Con na camada de irradiação, para remover quaisquer áreas restantes com baixa irradiação solar. Outro critério adotado foi a orientação das superfícies. Assim, considera-se que no hemisfério sul, as superfícies orientadas a sul recebem menos irradiação solar do que superfícies voltadas para outras direções. Além disso, as superfícies quase planas devem ser mantidas, independentemente de sua orientação. Assim, com base na camada matricial de orientação, desconsiderou-se as superfícies voltadas para ao sul com um valor inferior a 22,5 graus ou superior a 337,5 graus (KHANNA, 2022).

Isso posto, criou-se uma nova camada matricial de irradiação solar, com os valores convertidos para kWh/m², considerando tais critérios como condições para identificar as edificações aptas a receber sistemas fotovoltaicos. O resultado desses processos, é o mapa que mostra quanta irradiação solar cada célula raster adequada recebe (KHANNA, 2022).

Para agregar a área coberta por células adequadas para cada edifício (em m²) e sua irradiação solar média (em kWh/m²), utilizou-se da ferramenta *Zonal Statistics as Table*. Essa ferramenta converte as informações de camadas matriciais como a de irradiação solar, em formato tabular. Como esta tabela é independente, utilizou-se a ferramenta *Join Field* para realizar a junção desses dados à tabela de atributos da camada de pegadas das edificações. Com isso, pode-se aplicar o último critério para determinar a adequação de um sistema fotovoltaico, selecionando os edifícios com telhados com mais de 30 m² (KHANNA, 2022).

Assim, é possível saber o tamanho da área adequada em cada edifício. Dessa forma, foi criado um campo na tabela de atributos denominado Edifícios Adequados. Este campo contém a quantidade total de irradiação solar recebida por ano pela área útil de cada edifício. Para calcular este campo, multiplicou-se a área adequada de cada edifício por sua irradiação solar média por metro quadrado. Com isso, determina-se quanta irradiação solar cada edifício adequado recebe em um ano típico (KHANNA, 2022).

Por fim, converteu-se os valores de irradiação solar utilizáveis em potencial de geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos. Considerando que a geração de energia elétrica não depende apenas da radiação solar, mas também da eficiência dos painéis e da taxa de desempenho da instalação, foram utilizadas estimativas conservadoras fornecidas pela Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos, de 16% de eficiência e 86% de taxa de desempenho, as quais foram multiplicadas pela quantidade de kWh determinada para cada polígono. Assim, obtém-se o resultado do potencial de geração fotovoltaica por edifício, que foi dividido por mil, convertendo o resultado de kWh para MWh (KHANNA, 2022).

4. Resultados

Na Tabela 1, estão sintetizadas as informações obtidas pelo geoprocessamento dos dados. As edificações selecionadas correspondem aos edifícios considerados adequados para instalação de sistemas fotovoltaicos. Multiplicando a irradiação solar solar média anual (kWh/m²) pela área adequada de cada edificação, obtém-se a irradiação solar anual útil (kWh). Multiplicando irradiação solar anual útil pelos fatores de eficiência dos painéis fotovoltaicos e do desempenho da instalação, obtém-se as estimativas de potencial de geração fotovoltaica anual (kWh) para cada edificação. A soma das estimativas do potencial de geração fotovoltaica anual é de aproximadamente 1,8 MWh.

Na figura 2, estão apresentadas as edificações consideradas como adequadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos. A simbologia utilizada se baseia nas estimativas de geração elétrica por sistemas fotovoltaicos e representa a variação do potencial para cada edificação, medido em kWh, sendo a cor vermelha representativa do maior potencial e a cor amarela do menor potencial. Tais estimativas estão descritas com mais detalhes na Tabela 1.

Tabela 1: Síntese do processamento dos dados

Edificações selecionadas	Irradiação solar média anual (kWh/m ²)	Área adequada (m ²)	Irradiação solar anual útil (kWh)	Geração Fotovoltaica anual (kWh)
M2	1620.8	56.7	91.9	12.7
M7	1653.7	88.8	146.8	20.2
M5	1664.6	127.5	212.2	29.2
M1	1674.4	159.7	267.5	36.8
I4	1650.1	408.1	673.4	92.7
I5	1647.2	837.2	1379.0	189.8
A1, A2, A3	1614.7	892.5	1441.0	198.3
CB	1596.0	1107.2	1767.1	243.2
M6	1652.0	1218.0	2012.2	276.9
I1	1625.1	1514.1	2460.5	338.6
I3	1634.6	1865.7	3049.6	419.6

Figura 2: Potencial de geração fotovoltaica por edifício



Parte da determinação dos potenciais físico-técnicos envolve o levantamento adequado do recurso solar disponível no local, sendo este um fator imprescindível para avaliar o potencial de geração fotovoltaica em um local. E para avaliar as estimativas de potencial, considera-se que as estimativas têm precisão quando os dados de entrada têm resolução suficiente para representar os formatos das edificações, o arranjo urbano e o sombreamento sobre os telhados, bem como estruturas sobre esses (LÁ GENNUSA, *et al.* 2011).

Assim, os resultados apoiados em geoprocessamento apresentaram estimativas de irradiação solar média anual em cada edifício com resolução de 1:1000 (10 cm) a partir dos MDS oriundos de tecnologia LiDAR, disponibilizados gratuitamente e online pelo portal Geosampa (PRODAM, 2020). Com tal resolução foi possível identificar a área disponível e adequada para a instalação de sistemas fotovoltaicos nos telhados, considerando seus critérios determinantes.

Tendo em vista que o campus da EACH-USP consumiu aproximadamente 1.269,5 MWh ao longo do ano de 2019, as estimativas de geração fotovoltaica no campus indicam que se caso todas as edificações selecionadas recebessem sistemas fotovoltaicos, os sistemas seriam conectados à rede (*on-grid*), suprimindo parcialmente a demanda da universidade em aproximadamente 0,14 %, já que as estimativas determinaram uma geração de aproximadamente 1,8 MWh ao longo do ano. Projetos fotovoltaicos com essa capacidade de geração distribuída são considerados como minigeração, os quais podem variar de 75 kW a 5 MW de potência.

O mapa do potencial de geração fotovoltaica por edifício indica as edificações que possuem maior capacidade de geração. Tal resultado pode auxiliar nas tomadas de decisão acerca dos edifícios prioritários para análises mais detalhadas. Em destaque, as edificações I3, I1 e M6 apresentaram os maiores potenciais, enquanto as edificações M2, M7, M5 apresentaram os menores potenciais. Observa-se que a irradiação solar média anual na tabela 1 tem valores similares para todas as edificações. O fator que diferenciou o potencial de geração fotovoltaica foi, principalmente, a irradiação solar anual útil, que foi calculada em função da área disponível e adequada de cada edificação. A área adequada, por sua vez, foi determinada a partir das condições estabelecidas como critérios para identificação das áreas mais propícias.

5. Discussão

A partir das informações apresentadas na seção anterior, o presente trabalho analisa e discute as aplicações das estimativas dos resultados no planejamento de geração fotovoltaica com base na revisão bibliográfica e na caracterização da área de estudo. Nesse sentido, considera-se que um planejamento básico, deve conter informações acerca da demanda energética da área de estudo e sua capacidade de geração. Além disso, deve-se considerar aspectos ambientais, técnicos, econômicos e sociais para avaliar o potencial de geração fotovoltaica e sua viabilidade integrando múltiplas dimensões e âmbitos (NERO, *et al.* 2020).

A determinação do potencial de geração fotovoltaica é fundamentalmente composta por três potenciais, entre os quais são citados: (i) potencial físico, que consiste na soma total das irradiações solares; (ii) potencial técnico (elétrico, geográfico e urbano), que relaciona a área apta por telhado e a eficiência e performance os sistema fotovoltaico; (iii) potencial econômico, no qual se considera os custos de implantação, manutenção, tempo de retorno de investimento e o ciclo de vida dos componentes do sistema fotovoltaico (IZQUIERDO, *et al.* 2008).

Dessa forma, considera-se que o modelo de irradiação solar elaborado neste trabalho através da aplicação do algoritmo *Area Solar Radiation* no ArcGIS Pro, possibilitou estimar o potencial físico e parte do potencial técnico da geração fotovoltaica com precisão. Na

execução do algoritmo, utilizou-se dos parâmetros padrões, adaptando a metodologia de Khanna (2022) para os dados de entrada da área de estudo selecionada neste trabalho.

Assim, além da determinação da irradiação solar, também foi possível estabelecer condições para selecionar os telhados mais adequados e ainda gerar estimativas de geração elétrica. Dessa forma, aspectos geográficos, astronômicos e técnicos foram integrados em análise, como por exemplo: latitude; inclinação e orientação da superfície; variação diária e sazonal da irradiação solar; área e irradiação mínima para instalação de sistemas fotovoltaicos. Portanto, pode-se dizer que a utilização de ferramentas de geoprocessamento para estimar geração fotovoltaica pode ser útil, tendo em vista a capacidade dessas ferramentas em realizar análises em diversas escalas, sobrepondo e integrando variáveis que determinam a geração fotovoltaica.

Portanto, em relação ao potencial físico e técnico foi possível realizar estimativas robustas, tendo em vista todas as variáveis que foram consideradas. Assim, considera-se que estimativas a partir de modelos de irradiação solar podem ser úteis para avaliações preliminares, visando identificar as áreas com maior potencial. Todavia, mesmo modelos de irradiação precisos, esses ainda necessitam de validação das informações em campo e calibração. Assim, pode-se avaliar a viabilidade técnica e financeira de projetos de sistemas fotovoltaicos mais detalhadamente, com medições *in loco*.

Mesmo com a incerteza associada aos modelos de irradiação solar baseados em MDS advindos de tecnologia LiDAR, ainda sim, esses se apresentam mais precisos comparativamente com modelos de irradiação solar com base em dados de satélite como do *Google Sunroof* e do *Mapdwell* (NERO, *et al.* 2020)

No que tange ao potencial econômico, pode-se utilizar das informações acerca da área disponível adequada, bem como da irradiação solar média anual, para dimensionar as quantidades dos componentes dos sistemas fotovoltaicos, bem como sua configuração. Nesse sentido, quanto mais informações a respeito dos materiais que configuram os sistemas fotovoltaicos, maior a acurácia das estimativas de capacidade de geração e por consequência, melhor serão os planejamentos. As estimativas sobre eficiência e taxa de desempenho das instalações utilizadas neste trabalho são consideradas conservadoras (KHANNA, 2022).

Também é preciso considerar que o retorno (*payback*) e o ponto de equilíbrio (*breakeven*), também dependem da eficiência e performance dos sistemas fotovoltaicos, que por sua vez dependem da qualidade dos materiais dos painéis e inversores, fator determinante para estimar custos de manutenção, reposição e descarte dos resíduos com o tempo de uso (OLIVEIRA, *et al.* 2018)

Portanto, as tendências de diminuição dos custos dessa tecnologia, apontam que sistemas fotovoltaicos têm sua viabilidade econômica cada vez mais acessível. Todavia, é preciso considerar a regulamentação, formas de financiamento, estruturas tarifárias e os padrões de cada concessionária para avaliar a viabilidade econômica de geração fotovoltaica. Mesmo assim, a iminência de outra crise hídrica torna a atratividade das fotovoltaicas ainda maior, já que a maior parte da eletricidade gerada no Brasil é proveniente de usinas hidrelétricas, as quais enfrentam uma diminuição nos reservatórios (BURNQUIST, *et al.* 2021; GALVÃO, & BERMAN, 2015)

Nesse contexto, em função da acessibilidade aos MDS da cidade de São Paulo através do portal Geosampa, nota-se que é possível utilizar fluxos de processamentos de dados similares aos aplicados neste trabalho, aplicados à cidade inteira. Assim, tais informações podem auxiliar na elaboração de políticas públicas de estímulo à instalação de módulos fotovoltaicos na cidade de São Paulo. Portanto, através da criação de modelos de irradiação solar que permitem estimar a geração fotovoltaica, é possível elaborar cenários e visões estratégicas de planejamento territorial das cidades, que podem ser integradas aos zoneamentos urbanos e os planos diretores das cidades (NERO, *et al.* 2020).

Se tratando de escalas urbanas, nota-se que é possível aplicar rotinas de automatização dos geoprocessamentos de dados utilizando o ModelBuilder ou Python no ArcGIS Pro (CELESTINO, *et al.* 2017).

No tocante à aspectos ambientais, considera-se que a partir das estimativas do potencial de geração fotovoltaica, pode-se determinar o carbono equivalente (CO₂e) que consiste nas estimativas da quantidade de CO₂ que deixou de ser emitida caso fosse utilizada uma fonte de energia fóssil para a geração de eletricidade. Assim, pode-se definir uma taxa de conversão de kWh para kg CO₂e. Com isso, é possível desenvolver políticas ambientais de combate às mudanças climáticas em função da redução das emissões de CO₂, em consonância com as metas e acordos estabelecidos internacionalmente (LIRA, *et al.* 2019).

Em relação à dimensão social do potencial de geração fotovoltaico, podem ser estabelecidos critérios socioeconômicos para identificar locais com maior potencial, tais como: IDH, renda, grau de escolaridade, valor do imóvel e consumo energético. Nesse sentido, também pode-se utilizar dados socioeconômicos como critérios para identificar as edificações mais adequadas em ambiente SIG. Assim, pode-se identificar áreas com maior rentabilidade (MAGOGA, *et al.* 2019).

Outro aspecto importante na determinação do potencial técnico de geração fotovoltaica são as características da rede elétrica das edificações como, por exemplo, tensão, perfil da curva de carga, potência nominal, bem como a discriminação de cada aparelho elétrico utilizado nos edifícios. Isso é fundamental para o dimensionamento do sistema, sua configuração e caracterização dos componentes e equipamentos de condicionamento (PINHO & GALDINO, 2014).

6. Conclusões

Este trabalho demonstrou que a metodologia proposta possui compatibilidade com o desenvolvimento de cidades inteligentes, sendo capaz de realizar simulações de irradiação de energia solar fotovoltaica em um nível de escala detalhado, a partir de modelos oriundos de LiDAR. O estudo também demonstrou que a análise espacial deve ser executada de maneira sistêmica, de modo a integrar os elementos da superfície para melhores resultados.

Esta pesquisa consistiu em um estudo multidisciplinar que auxilia a escolha dos locais prioritários de geração de energia fotovoltaica e serve para incentivar a instalação dessa fonte para o suprimento da demanda dos prédios da EACH/USP bem como para toda a cidade de São Paulo, já que no GeoSampa, os MDS de toda a cidade estão disponíveis.

Em síntese, este trabalho alcançou seus objetivos no que diz respeito à calcular a intensidade e a área da radiação solar; identificar os telhados adequados para instalação de sistemas fotovoltaicos e estimar a geração de energia elétrica por telhado de cada edificação.

Todavia, o potencial físico e técnico da geração fotovoltaica ainda precisa ser mais detalhado, tendo em vista estudos de viabilidade e dimensionamento. Portanto, apesar das limitações, a metodologia se mostrou útil para identificar os locais mais adequados para instalação de sistemas fotovoltaicos, auxiliando assim, o planejamento para essa fonte de energia.

Além disso, concluiu-se que as estimativas de geração fotovoltaica também podem servir em diversas aplicações para avaliar o potencial de geração fotovoltaico, considerando os aspectos ambientais, técnicos, sociais e econômicos dessa fonte de energia. Assim, as estimativas podem fundamentar estudos preliminares, contudo, deve-se considerar suas limitações.

Tendo em vista os resultados das estimativas sobre geração fotovoltaica na EACH/USP, e a discussão acerca dos aspectos dessa fonte de energia, pode-se concluir que a área de estudo possui alto potencial de geração, mas que ainda precisa ser demonstrado mais detalhadamente através de estudos de viabilidade técnica e econômica. Nesse sentido,

sugere-se para pesquisas futuras, avaliar a viabilidade técnica e econômica valendo-se das estimativas aqui apresentadas.

Portanto, os modelos de irradiação elaborados em SIG são considerados ferramentas úteis para gestão e planejamento de sistemas fotovoltaicos, auxiliando as tomadas de decisões, contudo precisam ser otimizados e aprimorados através de calibrações e ajustes que visam obter maior acurácia nas estimativas.

7. Referências bibliográficas

ABES. Atlas brasileiro de energia solar - Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; André Rodrigues Gonçalves; Rodrigo Santos Costa; Francisco J. Lopes de Lima; Ricardo Rüther; Samuel Luna de Abreu; Gerson Máximo Tiepolo; Silvia Vitorino Pereira; Jefferson Gonçalves de Souza. 2.ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.

ABSOLAR. Infográfico: Energia solar fotovoltaica no Brasil em novembro de 2021. Associação Brasileira de Energia Solar fotovoltaica. Nº38. São Paulo/SP - Brasil. Material atualizado mensalmente. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em 28 de nov. 2021.

BEN/EPE - Relatório Síntese 2021 do Balanço Energético Nacional (Ano base 2020). Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf>. Acesso em 7 de fev. 2022.

BPBES - Sumário para tomadores de decisão - Relatório Temático: Água (Biodiversidade, Serviços Ecossistêmicos e Bem-Estar Humano no Brasil. Plataforma Brasileira de Biodiversidade de Serviços Ecossistêmicos. 2019. São Carlos/SP. Editora Cubo. Disponível em: <https://www.bpb.es.net.br/wp-content/uploads/2018/11/BPBES_SPM_Agua.pdf>. Acesso em: 7 de fev. 2022.

BNDES. Critérios de Avaliação de Projeto de Geração Distribuída por Fonte Solar Fotovoltaica. Banco Nacional de Desenvolvimento, 2019. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/ba5d0b8f-e5ec-470c-8344-d259b29062c5/criterios-geracao-solar-bndes-10.pdf?MOD=AJPERES&CVID=mHwpY4P>>. Acesso em: 9 de fev. 2022.

BURNQUIST, H.; DENNY, D. Risco de apagão e de racionamento de energia elétrica: de volta para o futuro? Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (CEPEA/ESALQ - USP). Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP - Brasil. 2021. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniao-cepea/risco-de-apagao-e-acionamento-de-energia-eletrica-de-volta-para-o-futuro.aspx#_ftnref1>. Acesso em 7 de fev. 2022.

CELESTINO, V. S.; JULIÃO, R. P. Modelagem geográfica e energias renováveis: aplicações para apoio à decisão. IV Simpósio Brasileiro de Geomática – SBG2017. II Jornadas Lusófonas - Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica - CTIG2017. ISSN 1981-6251 -. Presidente Prudente - SP, 24-26 de julho de 2017 p. 134-141.

CRESESB. Potencial Solar - SunData v 3.0. Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito/CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Rio de Janeiro/RJ. 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 9 de fev. 2022.

CRUZ, F. Metodologia de análise do potencial solar e eólico na zona urbana apoiado em geoprocessamento – Caso USP Campus Butantã. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2017.

ESRI Inc. Modeling Solar Radiation - Solar radiation toolset concepts. 2022. Disponível em: <<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/modeling-solar-radiation.htm>>. Acesso em: 19 de jul. 2022.

FONTES, J. Desempenho ambiental e competitivo: analisando o trade-off / Julia Cavalcante Fontes. Rio de Janeiro, 2012. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, Programa de Pós-Graduação em Economia.

FRANCO, G. & PINHEIRO, R. Estudo comparativo das estimativas de energia fotovoltaica gerada sobre superfícies tridimensionais em ambiente SIG e das informadas pela plataforma Sundata. Brazilian Journal of Development. Curitiba, v. 6, n.12. 2020. ISSN 2525-8761.

GALVÃO, J. & BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo. São Paulo/SP - Brasil. 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ea/a/vkWLM6pfvzMGj8NxySXHbZm/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 7 de fev. 2022.

IEA. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector - Summary for policy makers. International Energy Agency. 2021. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ebafc81-74ed-412b-9c60-5cc32c8396e4/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector-SummaryforPolicyMakers_CORR.pdf>. Acesso em: 19 de jul. 2022.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável - ODS 7 Energia acessível e limpa. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html>>. Acesso em: 4 de fev. 2022.

IPCC. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Summary for policy makers. 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf>. Acesso em 19 de jul. 2022.

IRENA. World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway - Executive summary. International Renewable Energy Agency. 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_WETO_Summary_2022.pdf?la=en&hash=1DA99D3C3334C84668F5CAA029BD9A076C10079>. Acesso em: 19 de jul. 2022.

IZQUIERDO, S.; RODRIGUES, M.; FUEYO, N. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, v. 82, n. 10.

KHANNA, D. Estimate solar power potential. Learn ArcGIS and ESRI Inc. Disponível em: <<https://learn.arcgis.com/en/projects/estimate-solar-power-potential/>>. Acesso em: 19 de jul. 2022.

LÁ GENNUSA, MARIA & LASCARI, GIOVANNI & RIZZO, GIANFRANCO & RIZZO, GIANFRANCO & SCACCIANOCE, GIANLUCA & SORRENTINO, GIANCARLO. 2011. A model for predicting the potential diffusion of solar energy systems in complex urban environments. *Energy Policy*, Elsevier, vol. 39(9), pages 5335-5343, September.

LIRA, M.; MELO, M.; RODRIGUES, L.; SOUZA, T. Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO₂ no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 34, n. 3, 389-397, 2019. [rbmet.org.br DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0102-778634304](http://dx.doi.org/10.1590/0102-778634304).

PDEE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 - Caderno de Análise Socioambiental. 2020. Empresa de Pesquisas Energéticas; Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno%20de%20Meio%20Ambiente%20-%20PDE%202030_rev_p%3%B3sCP_11.02.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2022.

PRODAM. Cartografia 3D da capital está no GeoSampa. Empresa de Tecnologia da Informação e Comunicação do Município de São Paulo. 2020. Disponível em: <<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/inovacao/prodam/noticias/index.php?p=296915#:~:text=Para%20visualizar%20o%20levantamento%20LiDAR,modelo%203D%20da%20%3%A1rea%20escolhida.>>. Acesso em: 19 de jul. 2022.

OLIVEIRA, A. et al. Análise técnica e econômica de fontes de energia renováveis. N. S. FUGANHOLI, P. H. S. CUNHA, V. A. BARELLI, M. P. M. BUNEL e L. F. NOVAZZI. *The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC*, Vol. 04 N. 01 (2018). Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/2502/1053>>. Acesso em: 04 de fev. 2022.

OLIVEIRA, L. Avaliação de fatores que influenciam na estimativa da geração e operação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG - Brasil. 2017. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1119D.PDF>>. Acesso em: 9 de fev. 2022.

ONU. Acordo de Paris sobre o clima - Conferência das partes, vigésima primeira sessão. Organização das Nações Unidas. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/node/88191>>. Acesso em: 19 de jul. 2022.

PINHO & GALDINO. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPTEL/CRESESB, 2014.

PUSP-C. Consumo de energia - Unidades. Prefeitura do campus da capital da Universidade de São Paulo. Informativo sobre consumo de energia elétrica - unidades monitoradas. 2021.

Disponível em: <<https://puspc.usp.br/consumo-de-energia-unidades/>>. Acesso em: 04 de fev. 2022.

MAGOGA, G.; LEITE, P.; MELO, D. Mapeamento do potencial solar fotovoltaico em telhados domiciliares de um município. Revista Brasileira de Iniciação Científica. Itapetininga, v. 6, n.5, p. 89-102, 2019. Edição Especial Universidade Federal do ABC (UFABC).

MOREIRA, E. et al. A modelagem da geração fotovoltaica distribuída e seus impactos na perspectiva do planejamento de sistemas elétricos. VALE, M.; OLIVEIRA, L. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado/RS - Brasil. 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/47/47>>. Acesso em 9 de fev. 2022.

NERO, M. A.; SALIM, D.A.; MELLO, C.C.; AMARANTE, R.T.; FONSECA, B.M.; TEMBA, P. Construção de um modelo de potencial de radiação solar local e discussão das aplicações sustentáveis e potenciais associados. Sustainability in Debate - Brasília, v. 11, n.2, p. 190-207, aug/2020. ISSN-e 2179-9067.

EPE/MME. Relatório de Indicadores do Atlas de Eficiência Energética 2020. Empresa de Pesquisa Energética - Ministério de Minas e Energia (EPE/MME) em cooperação com a Agência Internacional de Energia (IEA). 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-556/Atlas%20consolidado_08_03_2021.pdf>. Acesso em: 7 de fev. 2022.

SANTIAGO, M.; ROCHA, D; CARVALHO, G. Estudo de Caso do Dimensionamento de um Sistema Solar Fotovoltaico no Campus João Pinheiro II do Centro Universitário UNA. União de Negócios e Administração. Belo Horizonte/MG - Brasil. 2016. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/atc_marcus_final.pdf>. Acesso em 7 de fev. 2022.

SILVA, J. et al. Análise comparativa das fontes de energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica, com levantamento de custos ambientais, aplicada ao distrito federal. SHAYANI, R.A.; OLIVEIRA, M.A.G. Universidade Federal de Brasília - Departamento de Engenharia Elétrica. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/527/527>>. Acesso em: 4 de fev. 2022.

WEITZ, L.; GINER, N.; CRAWFORD, A. Extract 3D buildings from LiDAR data. 2021. Learn ArcGIS, ESRI Inc. Disponível em: <<https://learn.arcgis.com/en/projects/extract-3d-buildings-from-lidar-data/>>. Acesso em 19 de jul. 2022.