

# Construção de um modelo de potencial de radiação solar local e discussão das aplicações sustentáveis e potenciais associados

*Case study of a model of local solar radiation potential and discussion on the associated sustainable applications and potentials*

Marcelo Antonio Nero<sup>a</sup>

Daniel Henrique Carneiro Salim<sup>b</sup>

Caio César de Sousa Mello<sup>c</sup>

Rafael Tarantino Amarante<sup>d</sup>

Bráulio Magalhães Fonseca<sup>e</sup>

Plínio Temba<sup>f</sup>

<sup>a</sup>*Departamento de Cartografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil  
End. Eletrônico: marcelo-nero@ufmg.br*

<sup>b</sup>*Departamento de Cartografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil  
End. Eletrônico: danielhcsalim@gmail.com*

<sup>c</sup>*Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil  
End. Eletrônico: caiocsmello@gmail.com*

<sup>d</sup>*Departamento de Cartografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil  
End. Eletrônico: rafaeltarantino@outlook.com*

<sup>e</sup>*Departamento de Cartografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil  
End. Eletrônico: brauliomagalhaes@ufmg.br*

<sup>f</sup>*Departamento de Cartografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil  
End. Eletrônico: temba.mobile@gmail.com*

doi:10.18472/SustDeb.v11n2.2020.27773

Received: 22/10/2019  
Accepted: 02/04/2020

ARTICLE- DOSSIER

## RESUMO

A transição sustentável para matrizes energéticas mais sustentáveis é uma demanda mundial e atual. Nesse sentido, a modelagem da radiação solar em alta resolução espacial é utilizada para avaliar o potencial de geração fotovoltaica em qualquer tipo de superfície e fornecer informações para planejamento e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. A partir do potencial técnico de geração, pode-se estimar o tempo de retorno do investimento do sistema fotovoltaico e a quantidade de gás carbônico que deixou de ser emitido ao adotar a energia fotovoltaica. No contexto quantitativo, o objetivo deste artigo foi abordar brevemente a metodologia técnica e construir um modelo de radiação solar incidente em prédios da EE-IGC-UFMG. No contexto da discussão das aplicações sustentáveis da ferramenta, o objetivo foi tratar de temas relevantes, tais como a construção de modelos de radiação e os potenciais associados, as escalas de aplicação e dificuldades e limitações da modelagem.

**Palavras-chave:** SIG. Energia Fotovoltaica. Modelo. Fotogrametria.

## ABSTRACT

*The demand for a sustainable transition to energy matrices of lower environmental impact is global and current. In this sense, the modeling of solar radiation in high spatial resolution is used to assess the potential of photovoltaic generation on any type of surface and provide information for the planning and dimensioning of photovoltaic systems. From the technical potential of generation, it is possible to estimate the systems payback time and the avoided greenhouse gas emissions when adopting photovoltaic energy. In the quantitative context, the objective of this article was to briefly address the technical methodology and build a model of solar radiation of EE-IGC-UFMG buildings. In the context of sustainable applications of the tool, the objective was to address relevant topics, such as the construction of radiation models and the associated potentials, the application scales, and the difficulties and limitations of the modeling.*

**Keywords:** GIS. Photovoltaic Energy. Model. Photogrammetry.

## 1 INTRODUÇÃO

Transformar a matriz energética global, majoritariamente pautada no uso de combustíveis fósseis, em sustentável e renovável é uma das principais formas de alcançar as metas estipuladas pelo Acordo de Paris (FALKNER, 2019; GIELEN et al. 2016; IEA, 2018; UN, 2015), as quais visam manter o aumento nas temperaturas globais abaixo do valor limite de 2°C. Nesse contexto, uma das principais soluções para atingir as metas de redução da emissão de gases de efeito estufa é a geração distribuída de energia elétrica fotovoltaica, tendo em vista sua capacidade de fornecer eletricidade a partir de uma fonte renovável e suprir diretamente os usuários próximos à fonte de captação em ambiente urbano (BESSER et al., 2019; FREITAS et al., 2015; LEE, 2018; ZINK et al., 2015).

A energia fotovoltaica tem relevante influência na mudança dos padrões de consumo e distribuição energética em centros urbanos, tendo em vista que as políticas públicas para redução da emissão de gases de efeito estufa promoveram a queda nos custos para as tecnologias de baixo carbono. Assim, os sistemas de geração de energia fotovoltaicos começaram a possuir custo-benefício relevante, sendo observadas as quedas nos preços de módulos fotovoltaicos na escala de 10% ao ano, desde 1980 (FALKNER, 2016; FARMOR; LAFOND, 2016). Além disso, no Brasil, foi adotada em 2012 a Resolução Normativa 482/2012 (ANEEL, 2012) que regulamenta a micro e a minigeração de energia elétrica por meio de geração fotovoltaica.

Saber o potencial de geração elétrica solar de um centro urbano, sua distribuição geoespacial e as características dos melhores lugares para a implementação de sistemas fotovoltaicos pode fomentar políticas públicas para o desenvolvimento de cidades inteligentes e energeticamente sustentáveis. Para tanto, os governos locais são responsáveis por aplicar, em suas cidades, as estratégias que fomentam a eficiência na produção e distribuição de energia solar (SANTOS et al., 2014).

Para facilitar a tomada de decisão, os gestores devem possuir como base de informação dados detalhados sobre a infraestrutura urbana, aliados às ferramentas de inteligência geográfica, para a elaboração de modelos e cenários futuros com análises quantitativas e robustas. Tais tomadas de decisão devem considerar as metas ambientais e energéticas, bem como direcionar políticas públicas para mudanças em legislações e incentivos ao investimento. O desenvolvimento de modelos solares de radiação em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) é uma informação crucial para atingir os itens supracitados, que é o sentido desta pesquisa.

Os objetivos específicos desta pesquisa são dois: (i) aplicar um algoritmo de modelo solar de radiação para os prédios da Escola de Engenharia e do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (EE-IGC-UFMG) e (ii) discutir os seguintes aspectos de relevância no tocante aos modelos de potencial fotovoltaico: distintos modelos de elevação adotados como dado de entrada; os potenciais técnico, econômico, social e ambiental que a modelagem da radiação solar pode explorar; as aplicações práticas para planejamento e tomada de decisão; uso de ferramentas on-line e algumas dificuldades associadas.

O artigo é introduzido inicialmente por uma breve fundamentação teórica, onde são abordados os modelos de radiação e tipos de Modelos Digitais de Superfície (MDS). Em seguida, apresentam-se a metodologia e resultados obtidos na construção no modelo de radiação solar para a EE-IGC-UFMG. Na sequência apresentam-se as discussões relativas aos modelos, abordando aplicações e limitações da tecnologia.

## 2 MODELOS E ALGORITMOS DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

A modelagem da radiação solar incidente pode ser computada por: (i) interpolação ou extrapolação geoestatística de dados de estações meteorológicas (ASSOULINE et al., 2017, ESCOBAR et al., 2015, WAN et al., 2015), sendo a precisão dependente da densidade de estações – geralmente insuficiente para o contexto de cadastro solar; (ii) satélites acoplados com sensores termais (MELIUS et al., 2013), como, por exemplo, os projetos SoDA, *European Solar Radiation Data*<sup>1</sup>, e o provido pelo NREL, *National Renewable Energy Laboratory*<sup>2</sup>, que conseguem abranger praticamente todo o planeta. No entanto, estes são limitados à resolução espacial insuficiente e pouca acurácia; ou (iii) modelos matemáticos associados à modelagem em SIG, que é o contexto desta pesquisa.

Os modelos solares baseados em SIG podem ser aplicados em diferentes escalas, como, por exemplo, em diversos países, tal como na Austrália (ROBERTS et al., 2018), na Suécia (LINGFORS et al., 2017), na Arábia Saudita (ASIF, 2016), na província de Salta, na Argentina (SARMIENTO et al., 2019), na cidade de Berlim (KRUGER; KOLBE, 2012) e em vilarejos (MAVROMATIDIS et al., 2015). Mais recentemente, em função de avanços na esfera do aprendizado de máquinas e processamento de imagens de satélite, vale ressaltar as plataformas solares que possuem grande potencial, por serem on-line, gratuitas e internacionais: *Google Sunroof*<sup>3</sup> e *Mapdwell*<sup>4</sup>.

As revisões de literatura abordam o tema considerando diferentes contextos de aplicação, metodologias de geração e técnicas de calibração de modelos solares, podendo ser consultadas para maiores detalhes em Choi et al. (2019), Freitas et al. (2015), Jakica (2018), Martín et al. (2015) e Yang et al. (2018).

O modelo da radiação solar contempla latitude, elevação, orientação da superfície do telhado, sombras projetadas pela topografia ao redor, a variação sazonal do trajeto do Sol e as atenuações atmosféricas. Tendo em vista que nem todas as infraestruturas urbanas são aptas à instalação de sistemas de painéis solares, devido à projeção de sombras de construções, bem como da arborização nas proximidades (LEE, 2018), tem-se que, ao se utilizar o MDS do entorno de uma edificação analisada, é possível identificar todas as características necessárias para a modelagem da incidência de radiação solar. Vale ressaltar, ainda, que quanto mais detalhe for captado no levantamento do modelo digital de elevação, mais realista será a quantificação da influência das sombras projetadas na redução do potencial de produção de energia solar fotovoltaica.

As ferramentas de GIS mais comumente utilizadas são o *Solar Analyst* do ArcGis e o *r.sun* do GRASS. Ambas utilizam MDS – arquivos digitais matriciais com *pixels* que possuem valores de altitudes – e são empregados no cálculo da irradiância solar em uma determinada superfície. Os MDSs podem ser gerados através de sensores *Light Detection And Ranging* (LiDAR), fotogrametria aérea tripulada, fotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ou imagens de satélites. De modo geral, os MDSs são utilizados para computar a elevação, inclinação e orientação de superfícies, bem como os sombreamentos causados por prédios, árvores ou estruturas físicas capazes de bloquear os raios solares. Além disso, empregam-se na solução das equações de distâncias e ângulos solares previstas nos modelos.

### 3 MDS PARA MODELOS DE RADIAÇÃO EM AMBIENTE SIG

Os MDSs utilizados como dado de entrada nos modelos solares em SIG podem ser produzidos por técnicas de sensoriamento remoto, com o emprego de sensores LiDAR, fotogrametria e processamento de imagens de satélites. O uso de imagens de satélites para gerar MDSs de resolução suficiente para adotar em projetos de energia fotovoltaica ainda é recente e carece de estudos. Entretanto, a fotogrametria e o LiDAR são tecnologias consagradas para levantamento de MDSs de qualidade posicional e resolução espacial submétricas, suficientes para o contexto abordado (LUDWIG; MCKINLEY, 2010; MOUDRY et al., 2019; ZINK et al., 2015).

Atualmente, a tecnologia com emprego do LiDAR é a mais adotada para levantamentos urbanos. Estes contêm sensores ativos que capturam a superfície topográfica com bastante detalhe por meio da emissão de pulsos eletromagnéticos com comprimentos de onda entre 10 e 250 nm (LUKAC et al., 2014). O resultado do levantamento consiste em uma nuvem de pontos, medida em pontos/m<sup>2</sup>, que necessita de pós-processamento e classificação de modo a separar as edificações, as ruas, as estruturas e a vegetação. Esta etapa geralmente é realizada pelo provedor do serviço, que deve apresentar a metodologia adotada (LINGFORS et al., 2017).

A fotogrametria é uma ciência que ganhou novas dimensões com a popularização e avanço tecnológico dos VANTs e algoritmos de visão computacional, principalmente o algoritmo Structure from Motion – MultiView Stereo (SfM-MVS). Resumidamente, para gerar MDSs e ortofotos via SfM-MVS, deve-se realizar voo fotogramétrico com fotos suficientemente sobrepostas de maneira frontal e lateral, para que durante o processamento computacional seja possível identificar os pontos em comum em diferentes fotos.

Isso possibilita a formação do modelo tridimensional, sendo que esses pontos, contendo informações tridimensionais, são então utilizados para compor uma nuvem mais densa, que posteriormente é interpolada para gerar o MDS e, em sequência, a ortofoto (COLOMINA; MOLINA, 2014; TONKIN; MIDGLEY, 2016). Em comparação com o processamento na fotogrametria tradicional, a etapa de *bundle adjustment* é realizada pelo SfM-MVS, considerando um bloco de imagens, e não apenas um par estereoscópico (ZINK et al., 2015).

## 4 METODOLOGIA DO ESTUDO DE CASO

### 4.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO SOLAR LOCAL

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado na EE-IGC-UFMG, localizados em Belo Horizonte, MG. Para se ter uma ideia mais global da metodologia da construção do modelo solar, é apresentado o fluxograma da Figura 1, sendo o detalhe de cada etapa apresentado no decorrer do texto. O VANT utilizado nessa pesquisa foi o DJI Phantom 4 Professional (P4P).

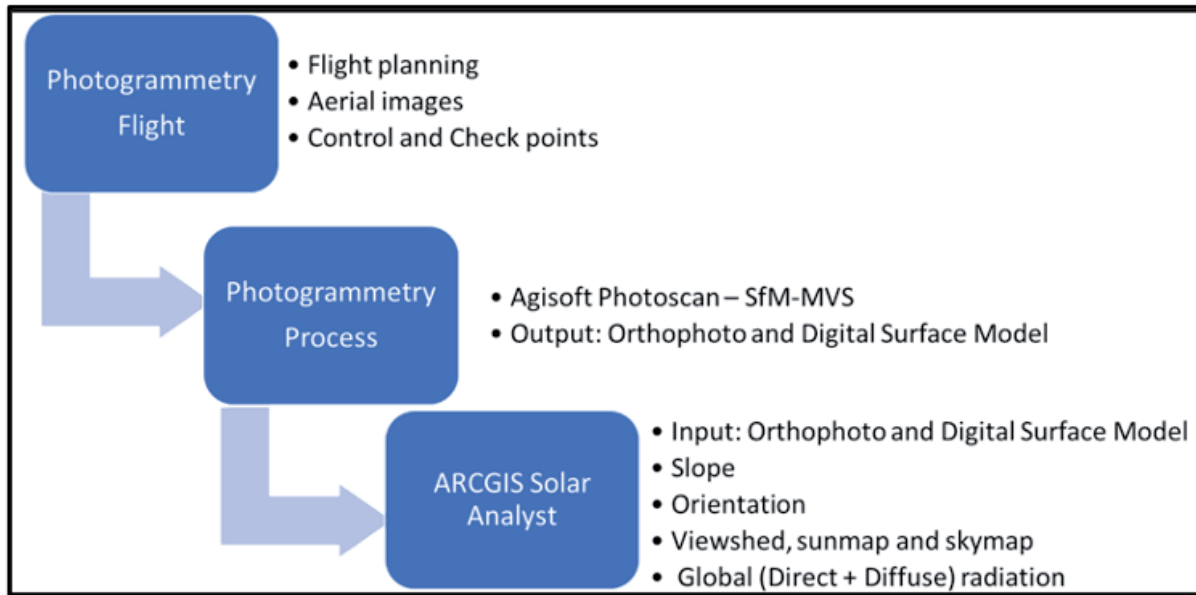


Figura 1 | Esquema geral da metodologia desenvolvida.

Fonte: Autores

## 4.2 FOTOGRAMETRIA – PARÂMETROS DE VOO E PONTOS DE CONTROLE

O programa utilizado para o planejamento de voo fotogramétrico foi o DJI Ground Station Pro. Os parâmetros de voo, tais como altitude, sobreposições lateral e frontal e a resolução espacial da ortofoto e do MDS exportados em formato .tif são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 | Parâmetros dos voos.

Descrição	Configuração
Altura do voo (m)	85
Sidelap (%)	75
Overlap (%)	80
Res. espacial ortofoto (cm pixel-1)	2,0
Res. espacial MDS (cm pixel-1)	50,0

Fonte: Autores

Para a aquisição das coordenadas em campo dos pontos de controle em solo (PCS) foi utilizado um receptor geodésico GNSS CHC X91+. Nessa pesquisa, adotou-se o método de posicionamento RTK via NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*), o qual é descrito com mais detalhe em Cintra et al. (2011), Dammalage et al. (2006) e Weber et al. (2005), por exemplo.

## 4.3 APLICAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA VIA AGISOFT PHOTOSCAN

O processamento fotogramétrico de imagens aéreas com objetivo final de construção de ortofoto e MDS da área levantada foi realizado empregando o programa *Agisoft Photoscan 1.4*. Esse programa utiliza a combinação dos algoritmos SfM-MVS para gerar a nuvem de pontos tridimensionais. De modo geral, os programas de fotogrametria são considerados ferramentas poderosas, eficientes, inovadoras e de grande impacto no campo do sensoriamento remoto. Para saber mais sobre o funcionamento do programa, recomendam-se os artigos de Colomina e Molina (2014) e Remondino et al. (2012).

Foram utilizados 11 pontos de controle para georreferenciamento mais acurado da nuvem de pontos (Figura 2), e, conseqüentemente, dos arquivos digitais dela oriundos, como o MDS e a ortofoto. Os

pontos representam uma cena virtual 3D, invariável em relação à escala e direção e posição das imagens. O MDS foi exportado em resolução controlada de 50 cm/pixel para processamentos computacionais posteriores. O MDS e a ortofoto foram então manipulados nas etapas seguintes utilizando o programa ARCGIS 10.4. A vetorização dos telhados foi feita de modo manual no mesmo programa.

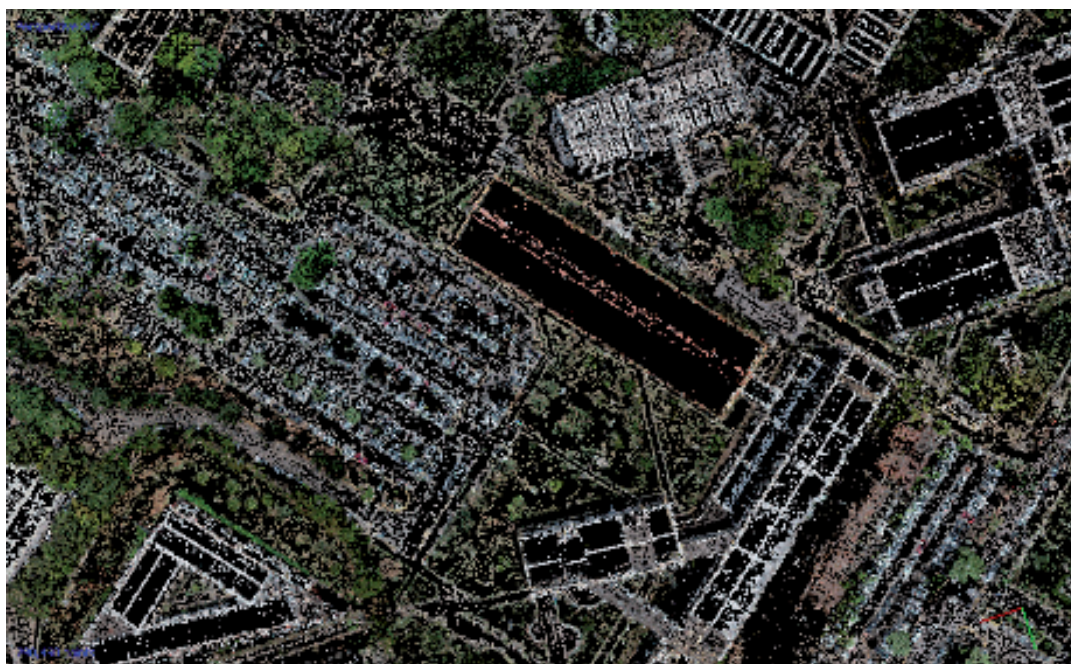


Figura 2 | Nuvem esparsa de pontos.

Fonte: Autores

#### 4.4 FERRAMENTA DE MODELAGEM DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE – ARCGIS SOLAR ANALYST

A ferramenta adotada nessa pesquisa foi o *ARCGIS Solar Analyst*, que inicialmente cria um conjunto de vistas para o céu por meio do cálculo dos máximos ângulos horizontais de obstrução – causados pelas topografias e estruturas próximas. Os ângulos são então convertidos para um arquivo matricial indicando a visão hemisférica para cada célula do MDS, chamado de *viewshed*.

Em seguida, realizou-se a sobreposição com o mapa solar, *sunmap*, que mostra a posição do Sol ao longo do tempo, e o mapa do céu, *skymap*, contendo os sítios de origem da radiação difusa. Nessa operação, 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. Fu e Rich (1999) abordam com mais detalhe o processamento da ferramenta *Solar Analyst*. Os resultados obtidos foram os arquivos matriciais que representam as radiações incidentes na superfície (KWh/m<sup>2</sup>) durante intervalo de tempo, como anual, mensal ou diário.

Os principais parâmetros do *ARCGIS Solar Analyst* 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 (CHOW et al., 2014). Para o estudo de caso em questão, adotaram-se os valores padrões do algoritmo, exceto a resolução do *skysize* que foi aumentada para 512 x 512 para aprimorar o cálculo de sombreamento.

## 5 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO

### 5.1 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS DIGITAIS (ORTOFOTO E MDS)

O levantamento aerofotogramétrico realizado com VANT e apoiado com pontos de controle teve como arquivo de saída a ortofoto com resolução espacial de 2 cm/pixel e MDS de 50 cm/pixel, apresentados nas figuras 3 e 4, respectivamente. Foi verificada a qualidade posicional por meio da comparação de 11 pares de coordenadas da ortofoto e do MDS com as obtidas a partir da coleta e processamento mais acurado a partir do receptor GNSS geodésico. Com erros médios absolutos menores que 10 cm e desvios padrão menores que 13 cm, verifica-se que ambos possuem alta precisão, suficiente para o objetivo dessa pesquisa, conforme o que já foi constatado também em Tonkin e Midgley (2016).

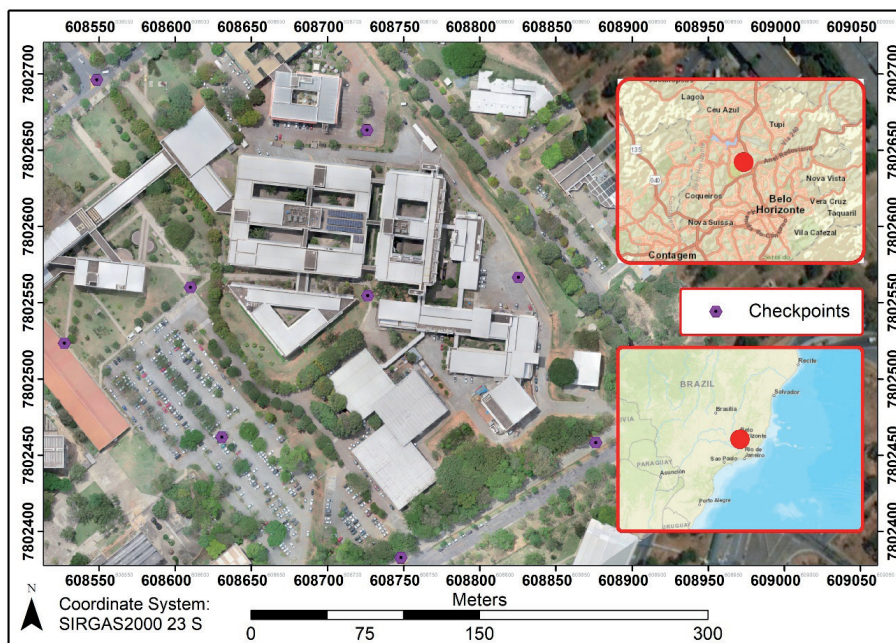


Figura 3 | Ortofoto com resolução espacial de 2 cm/pixel.

Fonte: Autores

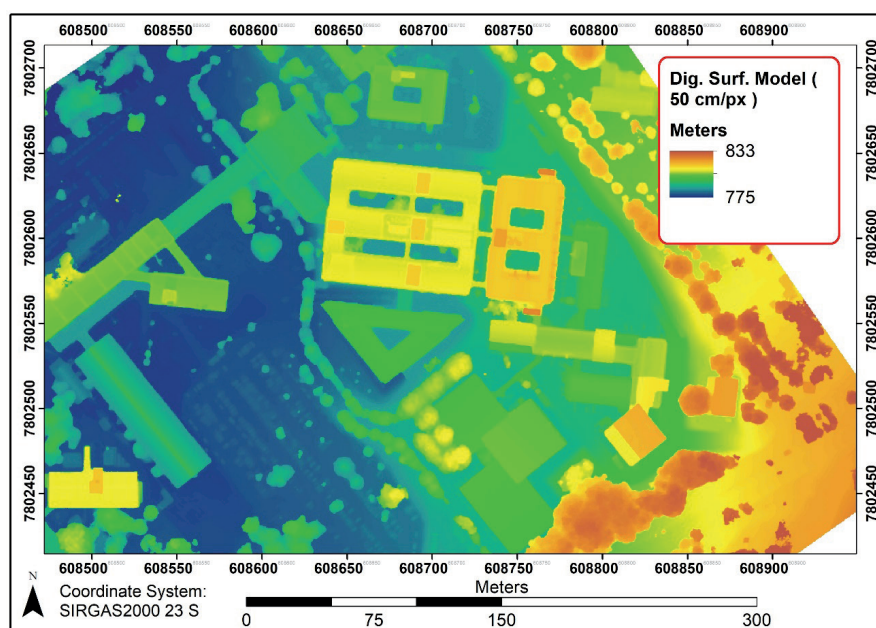


Figura 4 | Modelo Digital de Superfície de resolução espacial de 50 cm/pixel.

Fonte: Autores

## 5.2 MAPAS DE RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar incidente sobre uma superfície é obtida em função da inclinação e orientação desta. As figuras 5 e 6 apresentam essas informações para os telhados da EE-IGC-UFMG. Pode-se notar que os telhados possuem diferentes orientações e inclinações, resultando em diferentes resultados de radiação incidente.



Figura 5 | Declividade dos telhados da EE-IGC-UFMG.

Fonte: Autores

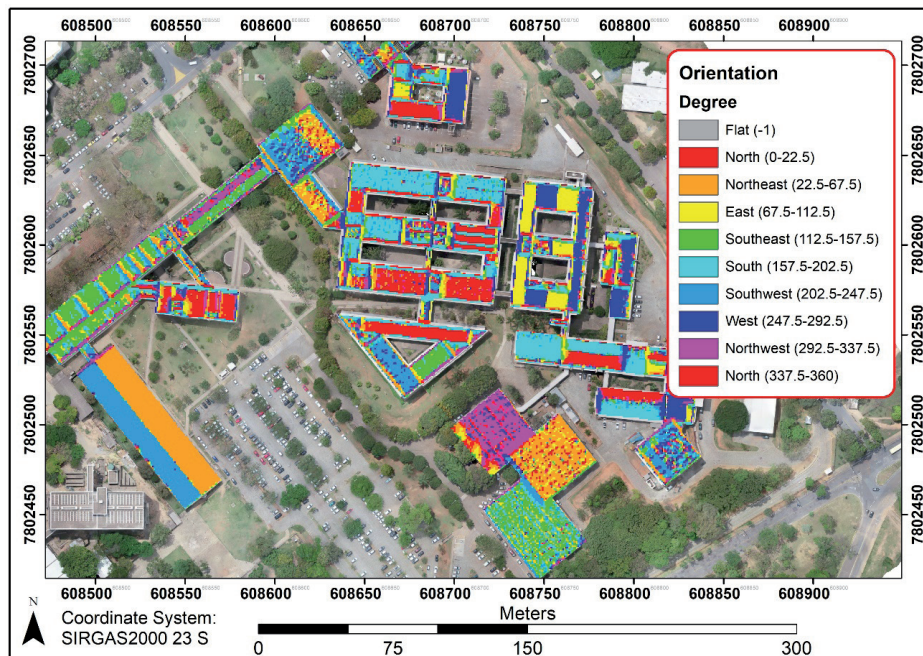


Figura 6 | Orientação da superfície dos telhados da EE-IGC-UFMG.

Fonte: Autores

Os principais resultados da ferramenta do *ARCGIS Solar Analyst*, que são o cálculo da radiação global anual e mensal, são apresentados nas figuras 7 e 8.



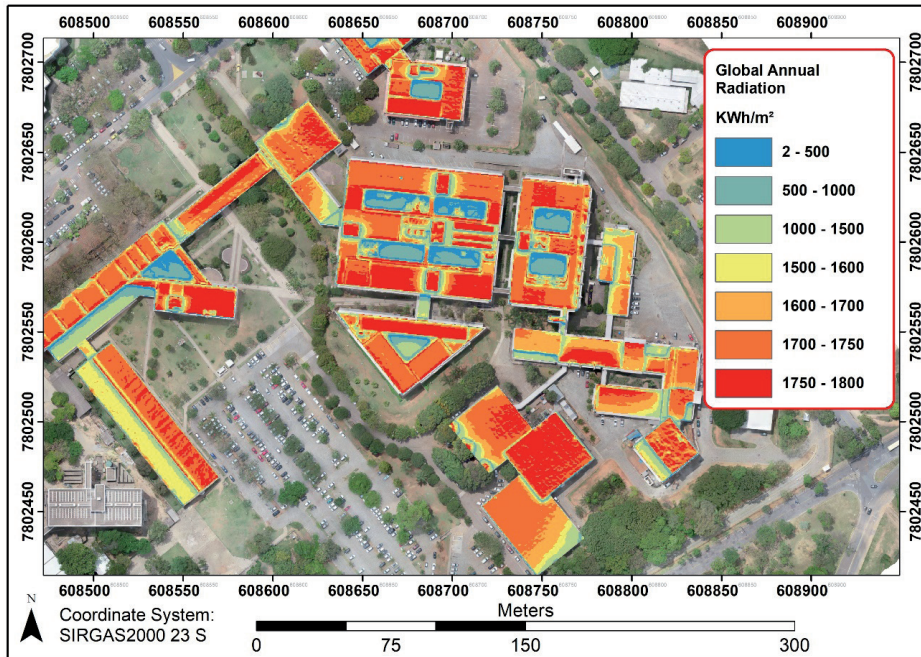


Figura 7 | Irradiância global anual da EE-IGC-UFMG.

Fonte: Autores

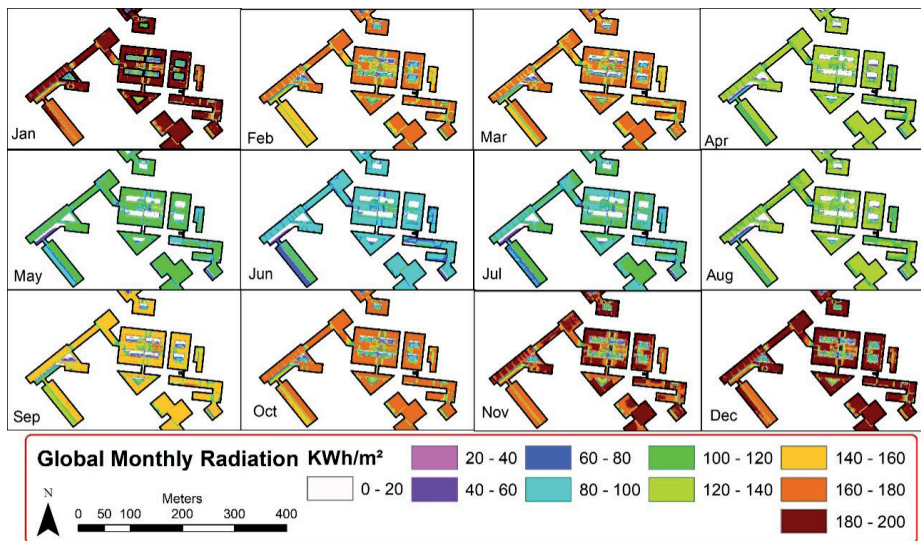


Figura 8 | Irradiância global mensal da EE-IGC-UFMG.

Fonte: Autores

Ao analisar os mapas de radiação, foi possível notar que alguns telhados possuem radiação incidente anual de até 1800 KWh/m<sup>2</sup>. Com a resolução do MDS utilizado, de 50 cm/pixel, foi possível identificar estruturas que impediriam a instalação de sistemas fotovoltaicos nos telhados, reduzindo assim a área disponível para tal. Também foi possível notar a influência do sombreamento causado por árvores e prédios vizinhos. Percebe-se também a maior incidência solar nos meses de verão em comparação com os de inverno.

## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 LIDAR VS FOTOGRAMETRIA COM VANTS

A comparação entre a fotogrametria e o LiDAR já foi alvo de discussão de diversos autores. As duas tecnologias são viáveis para levantamentos em ambientes urbanos para instalação de sistemas fotovoltaicos. Em suma, levantamentos LiDAR tem o maior custo relativo por prédio e requer maior *expertise* para operação e processamento, dificilmente seria contratado por uma empresa ou uma pequena cidade (SZABO et al., 2016). Ao se tratar de grandes áreas, maior que 1 km<sup>2</sup>, a fotogrametria pode ser utilizada, mas também exige esforço computacional e *expertise* similar ao LiDAR (TENEDÓRIO et al., 2016). Vale destacar que, para pequenas regiões, a fotogrametria pode gerar dados de maneira periódica, com espontaneidade e baixo custo.

Há de se atentar para a resolução do MDS inserido na modelagem solar, que em sua maioria é de 1,0 m/pixel e obtido via levantamento LiDAR. Moudry et al. (2019) e Schuffer et al. (2015) apontam que MDSs com resoluções espaciais submétricas são desnecessários, pois a variação ao longo do ano devido às condições atmosféricas é significativamente maior que a variação causada pelas diferentes resoluções.

Em oposição, Besser et al. (2019) e Zink et al. (2015) apontam que em MDS de 1,0 m/pixel não é possível identificar com clareza a área disponível para implantação de sistemas fotovoltaicos, pois não há representação detalhada de objetos sobre os telhados que impediram a instalação, tais como chaminés, caixas de máquinas de elevadores, caixas-d'água, etc. Zink et al. (2015) concluem que a resolução ideal para solucionar essa dificuldade é 0,25 m/pixel, e avisa que resoluções mais detalhadas interferem negativamente na operação matricial de cálculo de declividade e orientação do pixel, levando às falsas estimativas de radiação.

Recomenda-se avaliar a resolução suficiente para identificação de estruturas e a demanda computacional, que depende basicamente da resolução desejada e tamanho da área levantada. Nesta pesquisa foi adotado 0,50 m/pixel, mas há necessidade de explorar com mais sensibilidade a variação de resolução.

### 6.2 POTENCIAIS TEÓRICO, TÉCNICO, ECONÔMICO, SOCIAL E AMBIENTAL

O arquivo matricial do modelo de radiação solar é expresso em KWh/m<sup>2</sup>. Uma metodologia hierárquica comumente adotada por diversos autores para transformar o potencial teórico em técnico e econômico é apresentada por Izquierdo et al. (2008). Consiste em três etapas: (i) o potencial físico (teórico), que é a soma total das radiações solares; (ii) o potencial técnico (elétrico, geográfico ou urbano), que relaciona a área disponível por telhado e a eficiência e a *performance* da placa fotovoltaica durante a transformação de energia solar em elétrica; e (iii) o potencial econômico, que considera o custo do sistema fotovoltaico durante o ciclo de vida, basicamente os custos de implantação e manutenção, preços locais da eletricidade e o tempo de retorno de investimento (ASSOULINE et al., 2017; CHENG et al., 2018; MARTÍN et al., 2015).

O potencial técnico terá precisão adequada quando o MDS tiver resolução suficiente para representar as morfologias dos prédios, o arranjo urbano e o sombreamento decorrente, além de identificar estruturas sobre os telhados (LA GENNUSA et al., 2011), como, por exemplo, a presença de casas de máquinas de elevadores, caixas-d'água, etc.

Outro detalhe relevante é a utilização correta de algoritmos para segmentação e extração de telhados em imagens aéreas ou de satélite de alta resolução para que a medida da área disponível para implantar placas PV em telhados seja mais próxima da realidade. SIG também são utilizados para esta etapa crucial. A revisão proposta por Crommelinck et al. (2016) discute técnicas para vetorização de telhados em levantamentos fotogramétricos com Vants, enquanto Camargo et al. (2015) utilizaram a

ferramenta aberta PKTools, e Ninsawat e Hassin (2016) utilizaram o *software* eCognition para realizar a segmentação de telhados. Também vale destacar o trabalho realizado por Faria (2017).

A eficiência e *performance* do sistema fotovoltaico dependerão do modelo, inversor e tempo de uso, como apontado por Lukac et al. (2014) e Wigiton et al. (2010). A não linearidade é um fator inerente aos materiais semicondutores que compõem a placa fotovoltaica e aos pontos máximos de inversão (LUKAC et al., 2014). Dessa forma, quanto mais informações a respeito das eficiências do material adotado (orgânico, silício amorfo, monocristalino ou policristalino, entre outros), maior será a acurácia da estimativa de energia produzida, e, conseqüentemente, melhor serão os planejamentos estratégicos. Por exemplo, as placas de silício monocristalino e policristalino possuem mais que o dobro de eficiência das demais citadas (BERGAMASCO; ASINARI, 2011).

Outros autores consideraram relevante trabalhar as informações geradas pelo modelo de radiação solar para avaliar os possíveis impactos ambientais (DESTHIEUX et al., 2018; IZKARA et al., 2019; NOWACKA; REMONDINO, 2018). Por meio do potencial de geração de energia elétrica, é possível obter a quantidade de CO<sub>2</sub> que deixou de ser emitida caso fosse utilizada uma fonte de energia fóssil (ANSELMA, 2012; PENG et al., 2013), também conhecida como carbono equivalente, ou CO<sub>2e</sub>. Esclapes et al. (2014) definiram a taxa de conversão de 0,60 KgCO<sub>2e</sub> / KWh produzido, enquanto Lukac et al. (2016) estimaram 0,53 KgCO<sub>2e</sub> / KWh.

Com essa informação, a administração pública possui dados quantitativos para desenvolver políticas ambientais de combate às mudanças climáticas (CAMARGO et al., 2015) e pode incluir o CO<sub>2e</sub> oriundo da microgeração distribuída nas metas ambientais. Mavromatidis et al. (2015) afirmam que, em caso de ausência de políticas ambientais, é comum que o critério econômico seja seguido no processo de tomada de decisão.

Em relação à dimensão social, apontam-se duas abordagens propostas por Swam e Ugursal (2009): *top-down* e *bottom-up*. A primeira consiste em considerar setores residenciais em blocos, enquanto que a segunda consiste em avaliar individualmente os consumidores finais. A escala e a finalidade do mapeamento da radiação solar definem qual das abordagens adotar. Santos et al. (2014) estimularam a demanda energética de cada prédio e a classificaram em grupos com base na demanda local média *per capita*, nos volumes, áreas e altura de prédios, e na distribuição populacional.

Wigiton et al. (2010) adotaram a densidade populacional e a demanda de área de telhado *per capita* para quantificar o potencial fotovoltaico de Ontário (Canadá) para políticas públicas de energias renováveis. Gooding et al. (2011) estabeleceram critérios socioeconômicos para identificar locais de maior potencial, tais como renda, educação, consciência ambiental, quantidade de prédios e de proprietários. Kauzika et al. (2017), em estudo sobre a difusão da microgeração utilizando ferramentas solares, também apontaram quatro critérios sociais de maior relevância para aproveitamento fotovoltaico em prédios: renda, valor da casa, vizinhos que já possuem placas fotovoltaicas e consumo energético.

### 6.3 APLICAÇÃO DO MAPA DE RADIAÇÃO SOLAR

A disponibilidade de dados de energia fotovoltaica vem crescendo, assim como as cidades que disponibilizam essa informação. Na linha de metas sustentáveis, modelar o fenômeno da radiação solar em telhados é interessante para administradores públicos e investidores que desejam integrar planejamento urbano com a microgeração (FONSECA et al., 2016).

Nesse contexto, urbanistas e gestores públicos requerem visão compreensiva das oportunidades e do custo-benefício para otimizar a *performance* energética dos prédios. Também têm responsabilidades de revelar e comunicar de modo eficaz à população as informações sobre o potencial fotovoltaico e econômico, para mantê-la esclarecida e encurtar a transição energética no local. Notadamente, modelos solares em SIG são ferramentas que devem ser exploradas para atender a essas demandas.

Castellanos et al. (2017) sustentam que ter ferramentas precisas, acessíveis e de fácil compreensão para avaliar o potencial fotovoltaico é esperado para o desenvolvimento de políticas públicas apropriadas. Alertam também que decisões políticas são difíceis, pois administradores dependem de informações genéricas de modelos solares de baixa resolução ou precisam investir altas quantias para fazer a pesquisa de uma certa área em alta resolução.

De acordo com Santos et al. (2014), o planejamento básico para investimento em sistemas fotovoltaicos deve conter informações em relação à demanda energética e à capacidade de geração. Mais ainda, adotar a abordagem *bottom-up*, de discretização de prédios, é fundamental para um planejamento integral. E para tal, é necessário modelar o ambiente urbano, a radiação solar incidente e as áreas disponíveis nos telhados. Em sua maioria, o interesse público é de aumentar a participação da microgeração, e o interesse privado é implantar sistemas fotovoltaicos para gerar lucros (CAMARGO et al., 2015).

Mais recentemente, autores analisam a situação energética de forma mais aprofundada, considerando a maximização da participação de microgeração na rede elétrica e a minimização de investimentos (CAMARGO et al., 2015; LINGFORS et al., 2017; MAVROMATIDIS et al., 2015) e não uma análise direta da capacidade de potencial máximo com base em critérios técnicos. Decidir objetivamente a porcentagem adequada de penetração e ter um plano concreto para alcançá-la é, sem dúvida, uma contribuição para moldar a sustentabilidade energética e otimizar o uso do espaço.

O aumento excessivo da participação de microgeração apresenta prejuízos para todo o setor, que serão discutidos na seção seguinte. É importante evidenciar estudos que quantificaram a área total apropriada para instalação de sistemas fotovoltaicos, como Hofierka e Kanuk (2009) que classificaram 59% da área de telhados disponíveis em Bardejov, Eslováquia, como sendo apropriada, sendo 39% residências. Lee et al. (2018), em estudo no distrito de Gangnam, em Seoul, Coreia do Sul, classificaram prédios em quatro categorias, tendo como critérios técnico e financeiro, o potencial fotovoltaico e a rentabilidade.

No contexto de transição sustentável em uma cidade, Radzi e Droege (2013) indicam que mapear a capacidade de energias renováveis, os fluxos de energia, entender quais telhados e espaços abertos estão disponíveis para implantar sistemas renováveis de conversão em energia elétrica e termal são a base para alcançar a independência energética, de modo estruturado e com propósito. Ademais, De Waal e Stremke (2014) indicam que modelos solares são ferramentas que podem dar os primeiros passos para o debate de transição energética e preceder e auxiliar a criação de cenários espaciais e de visões estratégicas. Desthieux et al. (2018) justificam que a ferramenta *on-line* desenvolvida teve como meta principal promover a transição energética na escala local de Genebra, Suíça.

No contexto de mapeamento solar em áreas urbanas, a adoção de ferramentas *on-line*, de interface de fácil compreensão, que vetorizam telhados para compor o cadastro solar e que expõem dados objetivos é uma tendência. Besser et al. (2019) afirmam que essa abordagem resulta em decisões mais racionais e efetivas, e a população obtém informações de maneira fácil e transparente. Freitas et al. (2015) consideram que a última etapa em uma avaliação do potencial fotovoltaico é o desenvolvimento de uma plataforma *on-line*. Como exemplo de plataformas, têm-se: Jakubiec e Reinhart (2013) e Kruger e Kolbe (2012) – que resultou no projeto Mapdweel –, Desthieux et al. (2018) e Roberts et al. (2018) – que resultou no projeto APVI Solar Potential Tool (SunSPoT) – e Izkara et al. (2019).

Os *websites* devem definir o público-alvo, adaptar o conteúdo para o consumidor final e evitar esconder ou perder a qualidade da informação. Besser et al. (2019) elencam cinco principais atribuições de uma plataforma *on-line*: (i) identificação de partes disponíveis em telhados para instalação de sistemas fotovoltaicos e a capacidade anual de produção; (ii) quantidade de área disponível (m<sup>2</sup>), capacidade potencial de instalação (MW), capacidade potencial de geração (MWh) e indicadores ambientais e econômicos; (iii) visualização de mapas coloridos de potenciais e gráficos relacionando a geração fotovoltaica e economia para cada telhado; (iv) disponibilização de informações referentes ao telhado, como orientação, inclinação, entre outras que auxiliem na instalação e *design* do sistema fotovoltaico; e (v) geração de relatórios em PDF ou CSV.

## 6.4 DIFICULDADES E LIMITAÇÕES

Os modelos solares em SIG, apesar de serem considerados ferramentas para gestão que solucionam problemas e esclarecem decisões, ainda assim apresentam aspectos e metodologias que estão sendo aprimorados e otimizados. Podemos citar como exemplo a quantificação da penetração máxima de energia fotovoltaica na rede elétrica, a calibração de modelos solares, a extrapolação de modelos solares de resolução duvidosa, os custos relativamente altos para levantamentos LiDAR e a falta de comunicação eficiente com o público-alvo.

Uma das maiores dificuldades que o setor fotovoltaico ainda enfrenta é o desequilíbrio entre a geração e o consumo de energia elétrica ao longo do dia. A solução óbvia seria exportar eletricidade para a rede elétrica, porém, para casos em que há alta penetração de energia fotovoltaica na rede, esse excesso de eletricidade causaria desestabilidades na distribuição e reduziria a qualidade do serviço, além de reduzir a tarifa da energia elétrica devido à alta oferta (JANKO et al., 2016; TONKOSKI et al., 2012).

Para completar, na análise financeira, a combinação dos espaços temporais entre produção e consumo e o fenômeno de alta penetração implicam em redução nos valores de investimento e aumento do tempo de retorno de investimento, pois o custo da energia reduz com grande oferta durante o dia e nas horas de maior consumo – à noite, quando as tarifas podem ser maiores – não há geração de energia fotovoltaica (CAMARGO et al., 2018; ORIOLI; DI GANGI, 2013).

Camargo e Stoeglehner (2018) concluíram que participações de energia fotovoltaica na rede em torno de 20% não geram impactos consideráveis na distribuição e confiabilidade da rede elétrica, enquanto que mais de 40% resultam em queda dos indicadores de qualidade e confiabilidade. Também afirmam que estabelecer metas para um local específico requer análises técnicas e fatores econômicos para definir o limite de participação fotovoltaica. Mavromatidis et al. (2015), em estudo similar, mas tendo uma vila como exemplo, apontam 29% o valor ideal de participação para que o máximo da demanda energética seja satisfeito à geração fotovoltaica, sem a necessidade de armazenamento de energia, enquanto que 58% seria a participação ideal, caso houvesse armazenamento, fazendo com que toda a demanda energética seja suprida pela geração fotovoltaica.

No tocante à calibração de modelos, Szewczyk (2018) apresenta calibração de presença de nuvens no modelo *GRASS r.sun* e adverte que, em relação ao cadastro solar, as duas maiores dificuldades são obter dados tridimensionais da área urbana e a inserção de informações a respeito da nebulosidade ao longo do ano. Como é o caso de Roberts et al. (2018), que utilizaram *ARCGIS Solar Analyst* e dados do NREL para calibragem, enquanto Adelek e Smit (2016) utilizaram *GRASS r.sun* e adotaram os dados da *Surface meteorology and Solar Energy (SSE)* Nasa.

Szewczyk (2018) ajustou seu modelo *GRASS r.sun* utilizando dados do projeto SoDa e salienta que o algoritmo é preciso para dias de céu limpo, mesmo sem ajustes. Ajustar os modelos SIG utilizando dados em solo ou de satélites com sensores termais é de extrema relevância para que planejamentos energéticos, financeiros, ambientais e políticos sejam desenvolvidos com base em valores reais, evitando excessos e perdas em projetos particulares ou de escalas maiores.

Vale ressaltar estudo comparativo realizado por Castellanos et al. (2017) em que compara modelos solares com base em LiDAR encontrados na literatura revisada com modelos solares com base em dados de satélite e, portanto, de menor resolução, como do Google Sunroof, do Mapdwell e da Agência Internacional de Energia. Os principais resultados indicam variações de até 207% entre modelos de baixa resolução e 115% entre modelos de diferentes resoluções. Computaram também o desvio percentual do erro, contabilizando diferenças maiores que 300%. Dessa forma, os tomadores de decisão se encontram em uma posição difícil, pois ficam dependentes de informações de baixa precisão, ou terão que investir em pesquisas de LiDAR, reconhecidas pelo seu alto custo (CASTELLANOS et al., 2017).

Outra barreira discutida por autores é a funcionalidade da ferramenta perante a praticidade e a aceitação e a participação do público-alvo. Jakica (2018), após revisar centenas de modelos solares, realça a baixa qualidade da visualização dinâmica das informações e critica a baixa disponibilidade de algoritmos com código aberto. Wijeratne et al. (2018) revisaram 27 programas e aplicativos de gerenciamento e projeto de sistemas solares e apontaram 14 problemas relacionados às ferramentas. Vale destacar: (i) a falta de dados meteorológicos com baixo intervalo de tempo entre as amostras, modelagem 3D de alta qualidade e individualização de telhados; (ii) falta de dados locais de serviços e produtos relativos ao setor fotovoltaico; (iii) falta de informação em relação às tarifas e análise financeiras; (iv) falta de informações em relação a incentivos governamentais; e (v) interfaces dos programas e aplicativos não são amigáveis.

## 7 CONCLUSÃO

Este artigo teve os objetivos atingidos, que foram construir um modelo de radiação solar para os prédios da EE-IGC-UFMG; discutir aspectos de relevância no tocante aos modelos de potencial fotovoltaico, diante de distintos modelos de elevação adotados como dado de entrada; os potenciais técnico, econômico, social e ambiental que a modelagem da radiação solar pode explorar; as aplicações práticas para planejamento e tomada de decisão; uso de ferramentas *on-line* e algumas dificuldades associadas.

Sugere-se que este tipo de estudo, pautado majoritariamente em aspectos geográficos da região, seja agregado a análises de multicritérios que ponderem as metas de redução de emissão de CO<sub>2</sub>, o custo da tarifa e as formas de financiamento, a capacidade do sistema de distribuição de energia elétrica e a demanda energética, formando um conjunto robusto de dados para tomada de decisão pelos gestores do setor privado e do público. Ressalta-se que estimar o potencial fotovoltaico em prédios auxilia o planejamento financeiro, energético e ambiental para atender às demandas sociais em escala local.

Para pesquisa futura, os autores deste artigo planejam expandir a escala de aplicação dos modelos solares para o *campus* da UFMG ou uma cidade de menor porte, assim como também aprofundar nas aplicações e potenciais abordados ao longo do texto. Este artigo apresenta apenas os resultados iniciais de uma pesquisa mais ampla.

## NOTAS

1 | European Solar Radiation Data: <http://www.soda-is.com>

2 | National Renewable Energy Laboratory: <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer>

3 | Google Sunroof: <https://www.google.com/get/sunroof>

4 | Mapdwell: <https://www.mapdwell.com/en/solar>

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 09 maio 2019.

AMADO, M.; POGGI, F.; AMADO, A. R. Energy efficient city: a model for urban planning. **Sustainable Cities and Society**, v. 26, p. 476-485, 2016.

ASIF, M. Urban scale application of solar PV to improve sustainability in the building and the energy sectors of KSA. **Sustainability**, v. 8, n. 11, p. 1127, 2016.

ASSOULINE, D.; MOHAJERI, N.; SCARTEZZINI, J-L. Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: a machine learning approach. **Solar Energy**, v. 141, p. 278-296, 2017.

- BERGAMASCO, L.; ASINARI, P. Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: application to Piedmont Region (Italy). **Solar energy**, v. 85, n. 5, p. 1041-1055, 2011.
- BESSER, A. et al. A Customized Decision Support System for Renewable Energy Application by Housing Association. **Sustainability**, v. 11, n. 16, p. 4377, 2019.
- CAMARGO, L. R. et al. Spatio-temporal modeling of roof-top photovoltaic panels for improved technical potential assessment and electricity peak load offsetting at the municipal scale. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 52, p. 58-69, 2015.
- CAMARGO, L. R.; STOEGLEHNER, G. Spatiotemporal modelling for integrated spatial and energy planning. **Energy, Sustainability and Society**, v. 8, n. 1, p. 32, 2018.
- CASTELLANOS, S.; SUNTER, D. A.; KAMMEN, D. M. Rooftop solar photovoltaic potential in cities: how scalable are assessment approaches?. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 12, p. 125005, 2017.
- CHENG, L. et al. Use of LiDAR for calculating solar irradiance on roofs and façades of buildings at city scale: methodology, validation, and analysis. **ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing**, v. 138, p. 12-29, 2018.
- CHOI, Y.; SUH, J.; KIM, S-M. GIS-Based Solar Radiation Mapping, Site Evaluation, and Potential Assessment: a review. **Applied Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1960, 2019.
- CHOW, A.; FUNG, A.; LI, S. GIS modeling of solar neighborhood potential at a fine spatiotemporal resolution. **Buildings**, v. 4, n. 2, p. 195-206, 2014.
- CINTRA, J.; NERO, M.; RODRIGUES, D. GNSS/NTRIP service and technique: accuracy tests. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n. 2, p. 257-271, 2011.
- COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing**, v. 92, p. 79-97, 2014.
- DAMMALAGE, T. L. et al. Potential accuracy and practical benefits of NTRIP protocol over conventional RTK and DGPS observation methods. **Map Asia**, v. 29, 2006.
- DE WAAL, R.; STREMKER, S. Energy transition: missed opportunities and emerging challenges for landscape planning and designing. **Sustainability**, v. 6, n. 7, p. 4386-4415, 2014.
- DESTHIEUX, G. et al. Solar cadaster of Geneva: a decision support system for sustainable energy management. In: **From Science to Society**. Springer, Cham, 2018. p. 129-137.
- ESCLAPÉS, J. et al. A method to evaluate the adaptability of photovoltaic energy on urban façades. **Solar Energy**, v. 105, p. 414-427, 2014.
- ESCOBAR, R. A. et al. Estimating the potential for solar energy utilization in Chile by satellite-derived data and ground station measurements. **Solar Energy**, v. 121, p. 139-151, 2015.
- FALKNER, R. The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. **International Affairs**, v. 92, n. 5, p. 1107-1125, 2016.
- FARIA, T. S. **Classificação em área urbana apoiada em imagens aéreas e dados LiDAR**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2017, 94p.
- FARMER, J. D.; LAFOND, F. How predictable is technological progress? **Research Policy**, v. 45, n. 3, p. 647-665, 2016.
- FONSECA, J. A.; SCHLUETER, A. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. **Applied Energy**, v. 142, p. 247-265, 2015.
- FREITAS, S. et al. Modelling solar potential in the urban environment: state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 915-931, 2015.

GIELEN, D.; BOSHELL, F.; SAYGIN, D. Climate and energy challenges for materials science. **Nature materials**, v. 15, n. 2, p. 117, 2016.

GOODING, J. et al. Solar City Indicator: a methodology to predict city level PV installed capacity by combining physical capacity and socio-economic factors. **Solar Energy**, v. 95, p. 325-335, 2013.

HOFIERKA, J. et al. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In: **Proceedings of the Open source GIS-Grass users conference**. 2002. p. 51-70.

HOFIERKA, J.; KAŇUK, J. Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. **Renewable energy**, v. 34, n. 10, p. 2206-2214, 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Outlook 2018**. International Energy Agency Paris, France, 2018.

IZKARA, J. L.; EGUSQUIZA, A.; VILLANUEVA, A. GIS-3D Platform to Help Decision Making for Energy Rehabilitation in Urban Environments. In: **IOP Conference Series: earth and environmental science**. IOP Publishing, 2019. p. 012122.

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, p. 929-939, 2008.

JAKICA, N. State-of-the-art review of solar design tools and methods for assessing daylighting and solar potential for building-integrated photovoltaics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1296-1328, 2018.

JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations. **Solar Energy**, v. 93, p. 127-143, 2013.

JANKO, S. A.; ARNOLD, M. R.; JOHNSON, N. G. Implications of high-penetration renewables for ratepayers and utilities in the residential solar photovoltaic (PV) market. **Applied Energy**, v. 180, p. 37-51, 2016.

KAUSIKA, B. B.; DOLLA, O.; VAN SARK, W. Assessment of policy based residential solar PV potential using GIS-based multicriteria decision analysis: a case study of Apeldoorn, The Netherlands. **Energy Procedia**, v. 134, p. 110-120, 2017.

KODYSH, J. B. et al. Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 8, p. 31-41, 2013.

KRÜGER, A.; KOLBE, T. H. Building analysis for urban energy planning using key indicators on virtual 3D city models – The energy atlas of Berlin. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39, n. B2, p. 145-150, 2012.

LA GENNUSA, M. et al. A model for predicting the potential diffusion of solar energy systems in complex urban environments. **Energy Policy**, v. 39, n. 9, p. 5335-5343, 2011.

LEE, M. et al. Development of a rooftop solar photovoltaic rating system considering the technical and economic suitability criteria at the building level. **Energy**, v. 160, p. 213-224, 2018.

LINGFORS, D. et al. Comparing the capability of low-and high-resolution LiDAR data with application to solar resource assessment, roof type classification and shading analysis. **Applied Energy**, v. 205, p. 1216-1230, 2017.

LUDWIG, D.; MCKINLEY, L. Solar Atlas of Berlin-Airborne Lidar in Renewable Energy Applications. **GIM Int**, v. 24, n. 3, p. 17-22, 2010.

LUKAC, N. et al. Buildings roofs photovoltaic potential assessment based on LiDAR (Light Detection And Ranging) data. **Energy**, v. 66, p. 598-609, 2014.

LUKAC, N. et al. Economic and environmental assessment of rooftops regarding suitability for photovoltaic systems installation based on remote sensing data. **Energy**, v. 107, p. 854-865, 2016.

MARTÍN, A. M.; DOMÍNGUEZ, J.; AMADOR, J. Applying LiDAR datasets and GIS based model to evaluate solar potential over roofs: a review. **AIMS Energy**, v. 3, n. 3, p. 326-343, 2015.



- MAVROMATIDIS, G.; OREHOUNIG, K.; CARMELIET, J. Evaluation of photovoltaic integration potential in a village. **Solar Energy**, v. 121, p. 152-168, 2015.
- MELIUS, J.; MARGOLIS, R.; ONG, S. **Estimating rooftop suitability for PV: a review of methods, patents, and validation techniques**. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2013.
- MOUDRÝ, V.; BEKOVÁ, A.; LAGNER, O. Evaluation of a high resolution UAV imagery model for rooftop solar irradiation estimates. **Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 11, p. 1077-1085, 2019.
- NINSAWAT, S.; HOSSAIN, M. Identifying potential area and financial prospects of rooftop solar photovoltaics (PV). **Sustainability**, v. 8, n. 10, p. 1068, 2016.
- NOWACKA, A.; REMONDINO, F. Geospatial data for energy efficiency and low carbon cities – overview, experiences and new perspectives. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, 2018.
- PENG, J.; LU, L.; YANG, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 19, p. 255-274, 2013.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: Inpe, 2006.
- POLO, J.; PEREZ, R. Solar radiation modeling from satellite imagery. In: **Solar Resources Mapping**. Springer, Cham, 2019. p. 183-197.
- RADZI, A.; DROEGE, P. Governance tools for local energy autonomy. In: **Climate Change Governance**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. p. 227-242.
- REMONDINO, F. et al. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation – A critical overview. In: **Euro-Mediterranean Conference**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. p. 40-54.
- ROBERTS, M. B.; COPPER, J.; BRUCE, A. Analysis of Rooftop Solar Potential on Australian Residential Buildings. In: **Asia Pacific Solar Research Conference**. 2018.
- SANTOS, T. et al. Applications of solar mapping in the urban environment. **Applied Geography**, v. 51, p. 48-57, 2014.
- SARMIENTO, N. et al. A solar irradiation GIS as decision support tool for the Province of Salta, Argentina. **Renewable Energy**, v. 132, p. 68-80, 2019.
- SCHUFFERT, S. et al. Quality assessment of roof planes extracted from height data for solar energy systems by the EAGLE platform. **Remote Sensing**, v. 7, n. 12, p. 17016-17034, 2015.
- SZABÓ, S. et al. Automated registration of potential locations for solar energy production with Light Detection And Ranging (LiDAR) and small format photogrammetry. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3820-3829, 2016.
- SZEWCZYK, M.; SZEWCZYK, L. Modelling of real solar radiation spatial distribution as a tool for solar energy cadastre in the cities. **Energy & Environment**, v. 29, n. 2, p. 204-215, 2018.
- TENEDÓRIO, J. A. et al. Remote sensing from unmanned aerial vehicles for 3D urban modelling: case study of Loulé, Portugal. In: **Back to the Sense of the City: international monograph book**. Centre de Política de Sòl i Valoracions, 2016. p. 1118-1128.
- TONKIN, T.; MIDGLEY, N. Ground-control networks for image based surface reconstruction: an investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. **Remote Sensing**, v. 8, n. 9, p. 786, 2016.
- TONKOSKI, R.; TURCOTTE, D.; EL-FOULY, T. H. M. Impact of high PV penetration on voltage profiles in residential neighborhoods. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 3, n. 3, p. 518-527, 2012.
- UNITED NATIONS. **Paris agreement 2015**. Disponível em: <[https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)>. Acesso em: 12 set. 2019.

WAN, C. et al. Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 1, n. 4, p. 38-46, 2015.

WEBER, G.; DETTMERING, D.; GEBHARD, H. Networked transport of RTCM via internet protocol (NTRIP). In: **A Window on the Future of Geodesy**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. p. 60-64.

WIGINTON, L. K.; NGUYEN, H. T.; PEARCE, J. M. Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, n. 4, p. 345-357, 2010.

WIJERATNE, W. M. P. U. et al. Design and development of distributed solar PV systems: Do the current tools work? **Sustainable cities and society**, 2018.

YANG, D. et al. History and trends in solar irradiance and PV power forecasting: a preliminary assessment and review using text mining. **Solar Energy**, v. 168, p. 60-101, 2018.

ZINK, R. et al. Photogrammetric point clouds for GIS-based high-resolution estimation of solar radiation for rooftop solar systems. In: **Surface Models for Geosciences**. Springer, Cham, 2015. p. 293-305.