

Proposta de mapeamento do potencial de radiação solar em edificações com o uso de drone**Proposal of solar potential mapping for buildings using drones**

DOI:10.34117/bjdv5n11-135

Recebimento dos originais: 27/10/2019

Aceitação para publicação: 13/11/2019

Rafael Tarantino Amarante

Engenheiro Geólogo, Mestrando em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais
Instituição: GeotecLab/CPMTC, Universidade Federal de Minas Gerais
Endereço: Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901
E-mail: rafaeltageo@gmail.com

Daniel Henrique Carneiro Salim

Engenheiro Ambiental, Mestrando em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais
Instituição: GeotecLab/CPMTC, Universidade Federal de Minas Gerais
Endereço: Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901
E-mail: danielhcsalim@gmail.com

Pedro Henrique Figueiredo Araújo

Graduando em Engenharia Ambiental
Instituição: GeotecLab/CPMTC, Universidade Federal de Minas Gerais
Endereço: Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901
E-mail: pdr.figueiredo@gmail.com

Bráulio Magalhães Fonseca

Professor Adjunto do Departamento de Cartografia do Instituto de Geociências.
Instituição: GeotecLab/CPMTC, Universidade Federal de Minas Gerais
Endereço: Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901
E-mail: brauliomagalhaes@ufmg.br

José Renato Pereira de Jesus

Mestrando em Geografia – UFSJ e Professor Substituto do Departamento de Cartografia do Instituto de Geociências
Instituição: GeotecLab/CPMTC, Universidade Federal de Minas Gerais
Endereço: Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901
E-mail: jrenatopereira@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para quantificar o potencial de produção elétrica fotovoltaica a partir do cálculo de potencial de radiação solar diário para múltiplas edificações em ambiente urbano. Para tanto, são utilizados dados levantados com a utilização de drones e o processamento dos mesmos é realizado em ambiente SIG, através do algoritmo de visada hemisférico em conjunto com a equação simples de transmissividade de radiação solar. A metodologia utiliza de um modelo digital de superfície e a ortofoto obtida por drone para,

respectivamente, realizar a análise de radiação solar por área e vetorizar os limites de telhados das edificações. Os valores de radiação são individualizados para cada imóvel ao se aplicar a estatística zonal. Os resultados obtidos em uma área da região da Pampulha, em Belo Horizonte, permitiu quantificar o potencial de radiação em 2,77 a 4,85 kWh/m²/dia para cada edificação levantada, o que possibilita avaliar individualmente o valor econômico da produção obtida pela instalação de painéis fotovoltaicos em cada imóvel levantado. A metodologia pode ser utilizado como relevante ferramenta para fomentar cidades energeticamente sustentáveis, bem como políticas públicas para a geração de energia descentralizada.

Palavras-chave: Mapeamento Urbano; Potencial Solar; Aerolevantamento por Drones; Geoprocessamento Aplicado; Geotecnologia aplicada.

ABSTRACT

This work presents a methodology to quantify the potential of photovoltaic electric production from the daily solar radiation potential calculation for multiple buildings in urban environment. For this purpose, data raised using drones are used and their processing is performed in GIS environment, through the hemispheric sighting algorithm together with the simple equation of transmissivity of solar radiation. The methodology uses a digital surface model and the orthophoto obtained by drone to, respectively, perform the solar radiation analysis by area and vectorize the roof limits of the buildings. The radiation values are individualized for each property when applying the zonal statistics. The results obtained in an area of the Pampulha region, in Belo Horizonte, allowed to quantify the radiation potential at 2.77 to 4.85 kWh / m² / day for each building surveyed, which makes it possible to individually evaluate the economic value of the production obtained. by installing photovoltaic panels in each property raised. The methodology can be used as a relevant tool to promote energy sustainable cities, as well as public policies for decentralized energy generation.

Keywords: Urban Mapping; Solar potential; Drone aerial survey; Applied Geoprocessing; Applied geotechnology.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de buscar novas fontes sustentáveis de energia é uma das principais formas de atingir a meta de redução de emissões de gases do efeito estufa definido pelo Acordo de Paris (Falkner, 2019; Gielen et al. 2016). Neste contexto, a energia solar tem papel vital na mudança dos padrões de consumo energético em centros urbanos, devido ao crescente investimento em desenvolvimento de carros elétricos e a consequente substituição da matriz energética dos combustíveis fósseis para a energia elétrica. A partir dessa premissa, a elaboração de um mapeamento, economicamente viável, para quantificar o potencial de radiação solar para telhados de edificações em ambiente urbano é de fundamental importância para a implementação de cidades inteligentes e energeticamente sustentáveis.

A obtenção de informações sobre o potencial de produção de energia solar de uma cidade é uma relevante ferramenta para quantificar a capacidade de produção e para implementar planos de consumo energético utilizando estratégias sustentáveis. Além disso,

saber sobre a capacidade de geração de energia solar pode transformar bairros, distritos e áreas urbanas em pequenas planta de produção de energia elétrica (Santos et al. 2014; Kodysh et al. 2013; Falklev, 2017; Chow et al., 2014; Moojen et al. 2012)

Com a evolução tecnológica e barateamento dos módulos de painéis solares, a energia solar fotovoltaica começou a possuir custo-benefício relevante para o Brasil, principalmente, a partir de 2012 quando a agência reguladora ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) estabeleceu as regras que regulamentam a micro e minigeração de energia elétrica solar, através da Resolução Normativa 482/2012 (ANEEL, 2012) a partir da qual o Brasil adotou o mecanismo de compensação de energia, o que levou em consideração que um telhado com painéis solares podem ser conectados à rede elétrica pública através de uma Unidade Consumidora (UC) e assim devolver o excedente para a rede elétrica nacional, o que gera créditos que podem ser compensados na conta de luz do proprietário da edificação (Pereira et al. 2017).

Considerando os argumentos supracitados, observa-se que com a utilização do potencial de geração de energia solar as cidades se consolidam como sistemas energeticamente sustentáveis, podendo também transformar-se em potenciais geradores de excedente elétrico para localidades desprovidas de radiação solar suficientes para seu autoconsumo ou que estejam fora do alcance do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.

Os principais estudos relacionados ao mapeamento de potencial de radiação solar para edificações que foram utilizados como referência para o presente trabalho, destacam-se: Kodysh et al. (2013) e Santos et al. (2014) que utilizam dados LiDAR (Light Detection and Ranging) para a elaboração do mapa de radiação solar, porém trata-se de um dado de alto valor de aquisição, além de não permitir detectar estruturas presentes em telhados, como pequenas caixas d'água, antenas e chaminés, que podem influenciar no valor do resultado obtido e diminuir a área útil do telhado.

2. OBJETIVOS

Ao se obter a média de radiação solar incidente sobre telhados é possível estimar a quantidade de energia gerada pelo mesmo, o que possibilita planejar os locais favoráveis para instalação de painéis solares fotovoltaicos, sendo assim o presente trabalho propõe o mapeamento urbano de potencial de radiação solar a partir de aerolevantamentos por drones e VANTs (veículos aéreos não tripulados) em conjunto das ferramentas de Sistema de Informações Geográficas (SIG), tendo em vista que esses tipos de tecnologias possuem

viabilidade econômica para as necessidades de países em desenvolvimento, como o caso do Brasil, além de permitir avaliar as melhores edificações para a instalação de Painéis Solares Fotovoltaicos em um município.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração do mapeamento de potencial solar de edificações será utilizado os softwares Agisoft Metashape e o ArcGIS. Já os dados de entrada para o processamento são: um modelo digital de superfície, proveniente de levantamento por drones, e dados vetoriais dos limites dos telhados, delimitados a partir da ortofoto produzida no aerolevanteamento.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A localização selecionada para a aplicação da metodologia foi uma área de 219.284 m² na região da Pampulha, no bairro Indaiá, em Belo Horizonte – MG. A escolha da localização se deve ao fato da dicotomia entre as estruturas de construção urbana, sendo uma adensada com edificações próximas entre si, o que possibilita interpretar a influência das sombras de uma construção sob as outras. Já a segunda área possui edificações espaçadas e com árvores em volta das construções. Além disso, a variação altimétrica do terreno, possibilita observar telhados com cotas que variam de 750 a 815 metros, o que viabiliza a interpretação da influência da topografia na distribuição da radiação difusa.

Foram mapeados 70 edificações na área de estudo que são utilizadas para diferentes propósitos como residências familiares, prédios, indústrias e comércio. Ressalta-se que as edificações na borda do modelo digital de superfície foram desconsideradas para o cálculo de radiação, tendo em vista à ausência da influência da topografia ao redor dessas construções.

3.2 MAPEAMENTO DOS TELHADOS URBANOS COM DRONES

Apesar da radiação solar, que atinge o topo da atmosfera terrestre, ser relativamente contínua, com um potencial definido segundo a constância solar no valor de aproximadamente 1.366 kW/m², a radiação que atinge os telhados de infraestruturas urbanas pode variar segundo diversos fatores como, por exemplo, as variações sazonais na intensidade da radiação, as sombras projetadas pelas topografias adjacentes ou outras edificações, bem como as características físicas dos telhados como sua área, altura, inclinação e orientação. Todos esses fatores em conjunto impactam na quantidade final de radiação solar sobre as edificações.

O aerolevanteamento por drones foi realizado utilizando o Phantom 4 PRO da DJI, com apoio de 8 pontos de controle coletados a partir do GNSS Topcon Hiper SR, o que garante acurácia e precisão posicional ao levantamento. Já o processamento dos dados foi realizado utilizando-se do software Agisoft Metashape.

A altitude do aerolevanteamento foi de 120 metros e as fotografias foram registradas com 85% de sobreposição, o que possibilitou a geração de um modelo digital de superfície com 14,4 cm/pixel de resolução, enquanto a ortofoto utilizada para a vetorização dos telhados obteve a resolução de 3,61 cm/pixel.

3.3 CÁLCULO DO POTENCIAL DE RADIAÇÃO SOLAR PARA TELHADOS

Para identificar o potencial de radiação solar que incide sobre os telhados de edificações, realiza-se o cálculo da radiação solar incidente utilizando o algoritmo proposto por Rich et al. (1994), o qual é a base para a ferramenta Solar Radiation do ArcGis, que opera inicialmente em três cálculos - o campo de visada, o mapa solar (sunmap) e o mapa do céu (skymap). Subsequente aos cálculos supracitados, é utilizado um modelo simples de transmissão que realiza um cálculo final que resulta na estimativa da radiação solar para cada localização do modelo digital de superfície (MDS).

Já para o processamento, os dados de entrada são: um modelo digital de superfície e um arquivo vetorial com as áreas de telhados de edificações. Para tanto, é proposto uma metodologia com 4 passos principais, apresentados no fluxograma da Figura 1, são eles: (1) vetorização das áreas de telhado das edificações; (2) cálculo da incidência de radiação solar anual; (3) conversão da incidência de radiação solar anual para diária; (4) cálculo da estatística zonal para média diária de radiação em cada edificação.

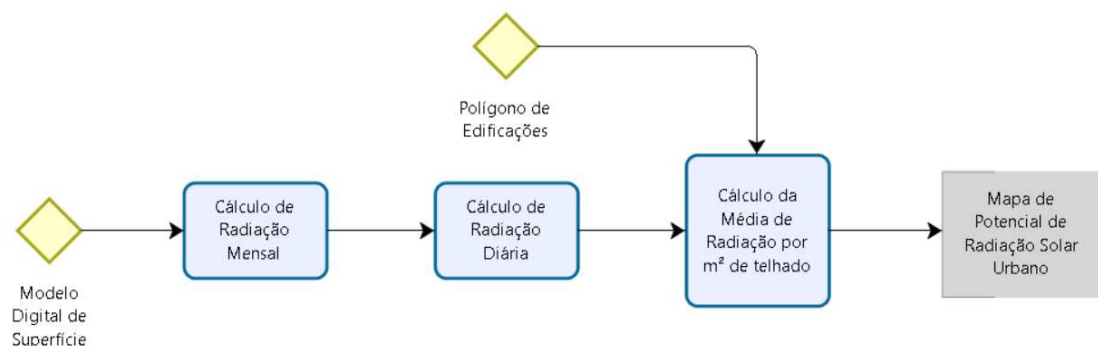


Figura 1 - Fluxograma da metodologia do mapeamento de potencial solar urbano.

3.4 VETORIZAÇÃO DAS ÁREAS DE TELHADOS

O primeiro passo da metodologia foi a vetorização da área de telhados das edificações presentes. A partir desse arquivo vetorial é possível setorizar as informações de radiação solar e realizar a estatística zonal para cada telhado da área de estudo a ser mapeada e assim expressar o valor médio da radiação solar por m^2 da superfície da estrutura. Uma vez que todas as edificações foram vetorizadas, foi atribuído uma indexação com códigos de identificação para cada uma das edificação.

3.5 CÁLCULO DE RADIAÇÃO SOLAR ANUAL

A radiação solar que atravessa a atmosfera é modificada pela topografia e outras características das superfícies, que então é interceptada como radiação direta e difusa. Segundo Fu (1999) a direta é o componente principal da radiação total, já a difusa é a segunda maior. Sendo assim o segundo passo da metodologia foi a realização do cálculo da incidência de radiação solar anual, em Wh/m^2 , sobre o modelo digital de superfície (MDS). Este processamento foi realizado a partir do cálculo da quantidade total de incidência solar direta e da incidência solar difusa, na qual o algoritmo (Rich et al. 1994) realiza o cálculo do campo de visada hemisférico para cada célula do modelo digital de superfície, o que leva em consideração a influência local das sombras de outras edificações e árvores sob o resultado de uma edificação específica, ambas as incidências são quantificadas para cada localização (pixel) do raster de entrada. O algoritmo utiliza também um modelo simples de transmissão, que utiliza a constante solar e leva em consideração os efeitos atmosféricos.

O algoritmo de cálculo de radiação gera um campo de visada hemisférico orientado a uma visada vertical em direção ao céu, o que é considerado por Fu (1999) como, essencialmente, a um resultado equivalente à uma imagem de uma câmera fisheye, com visada para o céu, em cada pixel do modelo digital de superfície (MDS). O campo de visada hemisférico é utilizado em conjunto aos mapas solar (Sunmap) e o do céu (Skymap), para realizar o cálculo acurado da insolação para cada pixel. O cálculo leva em consideração a latitude e elevação da área de estudo, orientação das superfícies, as sombras projetadas pela topografia ao redor, as mudanças diárias e sazonais nos ângulos de incidência dos raios solares e atenuação atmosférica.

O campo de visada hemisférico é calculado a partir de um conjunto de ângulos e direções em volta de um ponto específico do modelo de superfície (Figura 1a), a partir do qual determina-se o máximo ângulo de obstrução do céu (figura 1b). Sendo assim o resultado

determina quais partes do céu estão obstruídos a partir de uma determinada localização do MDS.

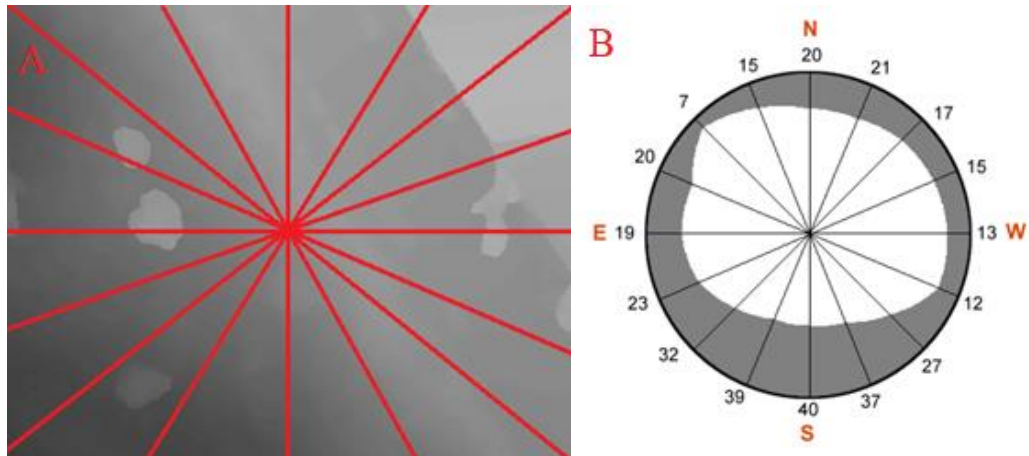


Figura 2 - (A) Ângulos horizontais traçados a partir de um ponto específico do MDS. (B) Resultado do campo de visada hemisférico para uma localização representando em quais direções o céu é visível ou não.

Fonte: Fu (1999).

A representação da radiação solar direta originada de todas as direções do céu é realizado pelo cálculo do mapa solar (Figura 3), que gera uma representação bidimensional em grids (com a mesma projeção hemisférica do campo de visada) que identifica as trajetórias do sol e suas variações ao longo do tempo para uma localização (Fu, 1999). A posição do sol (ângulos zenitais e azimutais) são calculados segundo a latitude, dia e horário, sendo para esse trabalho estipulado o intervalo de 0,5 horas.

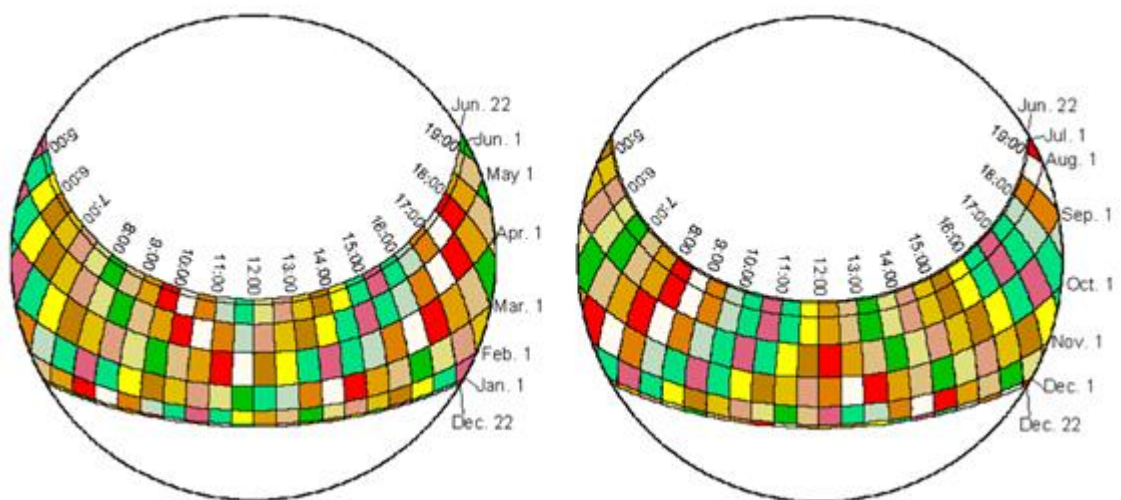


Figura 3 - Mapa anual solar, com intervalos de 1 horas por dia durante um ano. Fonte: Fu (1999).

O cálculo do mapa do céu é utilizado para representar a radiação solar difusa, que pode ser originada de qualquer direção do céu (Fu, 1999). Esse modelo divide o céu em vários setores

definidos por divisões zenitais e azimutais. A figura 4 demonstra um exemplo com 16 divisões zenitais e 16 azimutais.

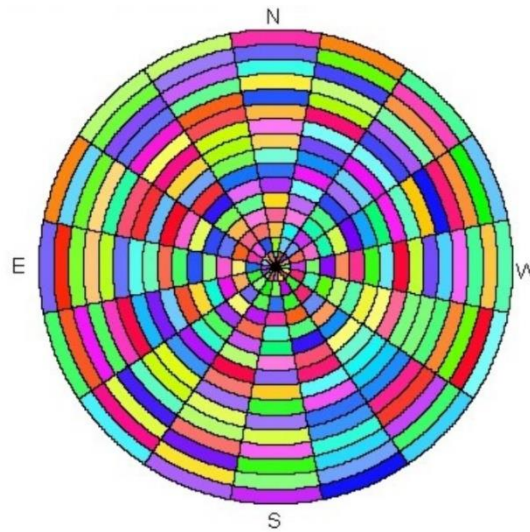


Figura 4 - Mapa do céu (skymap) com os setores definidos por 16 divisões zenitais e 16 divisões azimutais. Fonte: Fu (1999).

O mapa solar e o de céu são então sobrepostos ao campo de visada hemisférico (Figura 5) e então a proporção de áreas desobstruídas para cada mapa é computada. Para cada setor dos mapas que não estão completamente obstruídas, a radiação solar é calculada baseado segundo a posição do sol, a atenuação atmosférica e na orientação da superfície que recebe a incidência solar (Fu, 1999). A radiação solar global é calculada pela soma das componentes direta e difusa para todos os setores. Todo o processo é repetido para cada localização (pixel) da superfície topográfica do MDS, o que gera um mapa de insolação para toda área de estudo (Fu, 1999). O resultado desta etapa é apresentado na unidade Wh/m^2 .

Por fim para converter o modelo anual para um diário de incidência de radiação solar utiliza-se da calculadora raster na qual os valores de radiação foram divididos por 1000 para converter de Wh/m^2 para kWh/m^2 e, posteriormente, dividido por 365 para converter de valores anuais para diários.

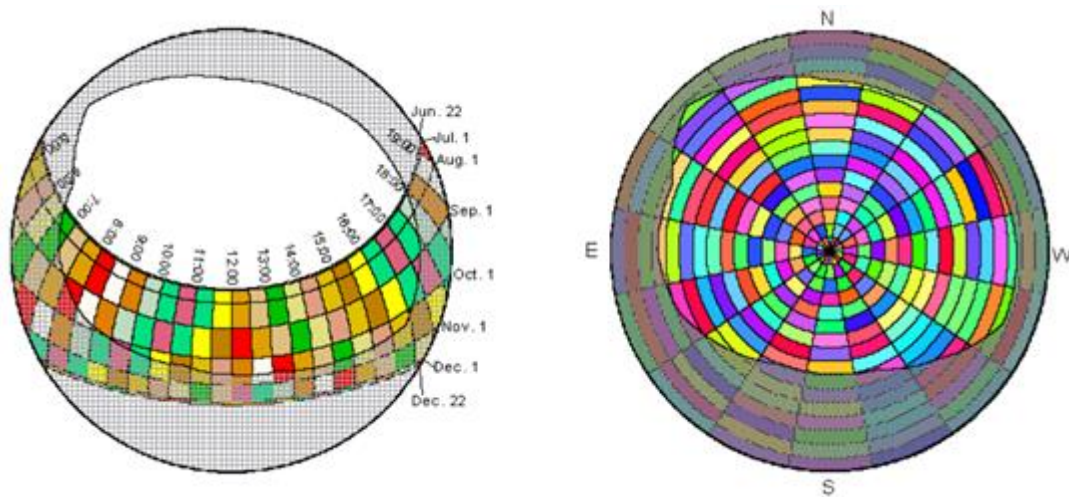


Figura 5 - Sobreposições do campo de visada hemisférico com o mapa solar (A) e o mapa do céu (B).
As áreas sombreadas são as direções obstruídas do céu. Fonte: Fu (1999).

3.6 CÁLCULO DA RADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA POR EDIFICAÇÃO

Depois de calcular a radiação solar para o modelo de superfície, o último passo é necessário para comparar os potenciais de radiação solar entre as edificações da área de estudo. Sendo assim, deve-se calcular uma análise estatística zonal do raster analisado, esse cálculo sumariza os valores por zonas que, no caso, são os telhados de cada edificação. Para este processamento utiliza-se a ferramenta Zonal Statistics as Table do conjunto Spatial Analyst Tools, sendo realizado o cálculo da média de radiação solar diária para cada telhado das edificações. O resultado é uma tabela com a informação de média diária de radiação solar para cada uma das edificações da área de estudo, segundo a indexação realizada no primeiro passo da metodologia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado final da aplicação permite elaborar o mapa de potencial de radiação solar para cada edifício da área de estudo, sendo demonstrado na Figura 6. Os resultados obtidos variaram de 2,77 a 4,85 kWh/m²/dia. Além disso, ao se considerar que a área útil para alocação de painéis solares seja de 40% de cada telhado e que todos tenham painéis solares instalados, pode-se inferir que a produção diária de energia de todos as edificações da área de estudo seja de 25.779,53 kWh.

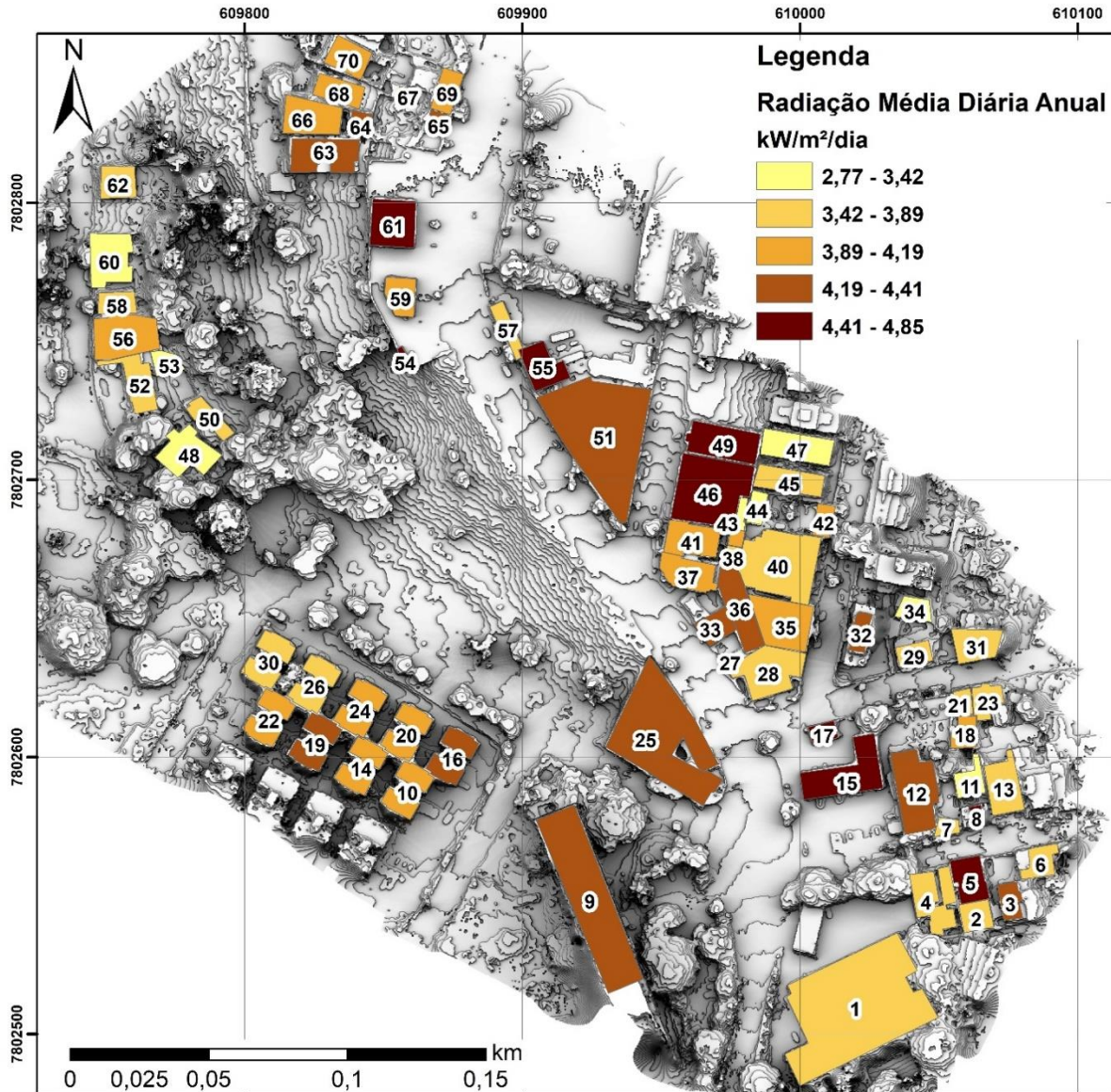


Figura 6 – Mapa de potencial de radiação solar diária em edificações.

Tendo em vista que Pereira et al. (2017) consideram que um bom painel solar fotovoltaico, bem dimensionado e testado pelo INMETRO, possui 80% de eficiência e a tarifa média do kWh no Brasil seja de R\$ 0,561, segundo os dados da ANEEL (2019), então é possível inferir que o telhado com maior valor de radiação (4,85 kWh/dia/m²) observado na área de estudo resulta em geração estimada de energia no valor de R\$65,30 por m² de painel instalado no mês, sendo observado na área, um total de 7 edificações com aproximadamente este potencial. Já as edificações com os piores valores, possuem uma economia estimada de R\$ 37,29 por m² de painel instalado durante um mês, sendo observado outras 7 edificações com esse potencial.

A análise comparativa entre o modelo de cálculo de radiação solar e da hipsometria do MDS para o setor noroeste do mapa (Figura 7), demonstra a importância da utilização de um modelo digital de superfície para a análise adequada da incidência de radiação solar. Na imagem é possível observar a influência da sombra de árvores sobre as edificações, na porção leste da área, a partir das quais obteve-se os menores valores de incidência de radiação diária média em toda área de estudo. Já as edificações a oeste, que encontram-se nas maiores cotas e com pouca influência de sombras, possuem os maiores valores de radiação solar, com destaque para a edificação 61, com ausência total de barreiras à insolação ao seu redor e, conseqüentemente com o maior valor de radiação da área.

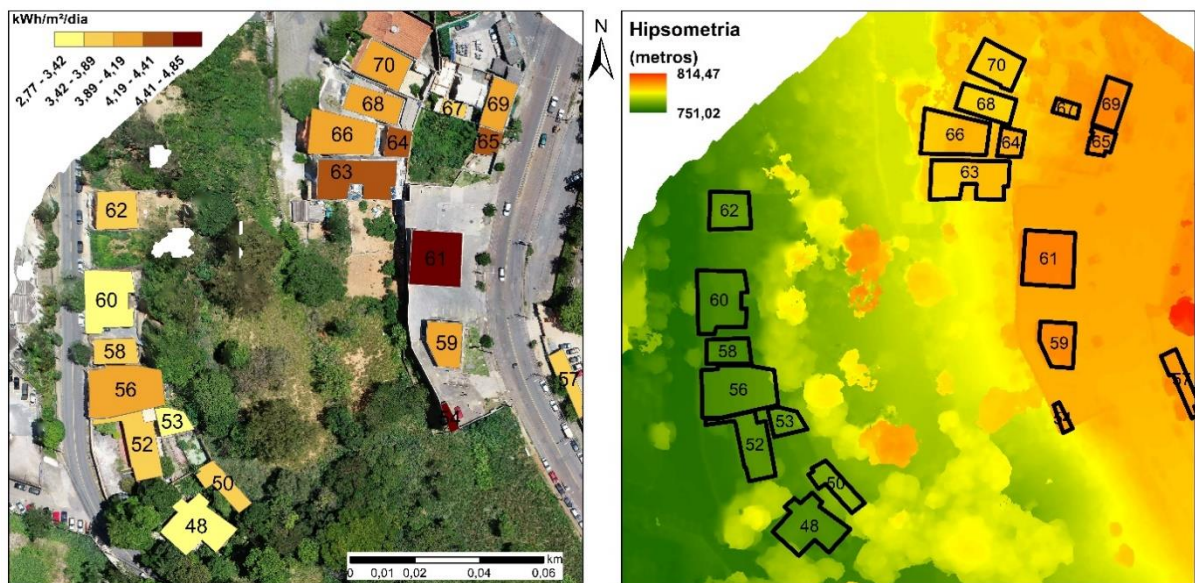


Figura 7 – Análise comparativa entre o cálculo de radiação solar e o mapa hipsométrico do setor noroeste do mapa de radiação solar.

Na figura 8, observa-se a análise comparativa do setor leste da área de estudo, com edificações adensadas e pouca influência de árvores na passagem da radiação solar, destaca-se nessa localização a influência da edificação de ID 32 na atenuação dos valores de radiação para as edificações 28, 35 e 40, que possuem valores abaixo da média em relação aos empreendimentos ao redor, que tendem por sua vez a possuir os maiores valores médios de radiação para toda a área de estudo.

Na mesma localização, é possível observar que as edificações 34, 43 e 44, possuem os menores potenciais por estarem entre as menores cotas de telhado do setor observado e, conseqüentemente o resultado da radiação é reduzido devido a influência das sombras projetadas pelas edificações ao redor.

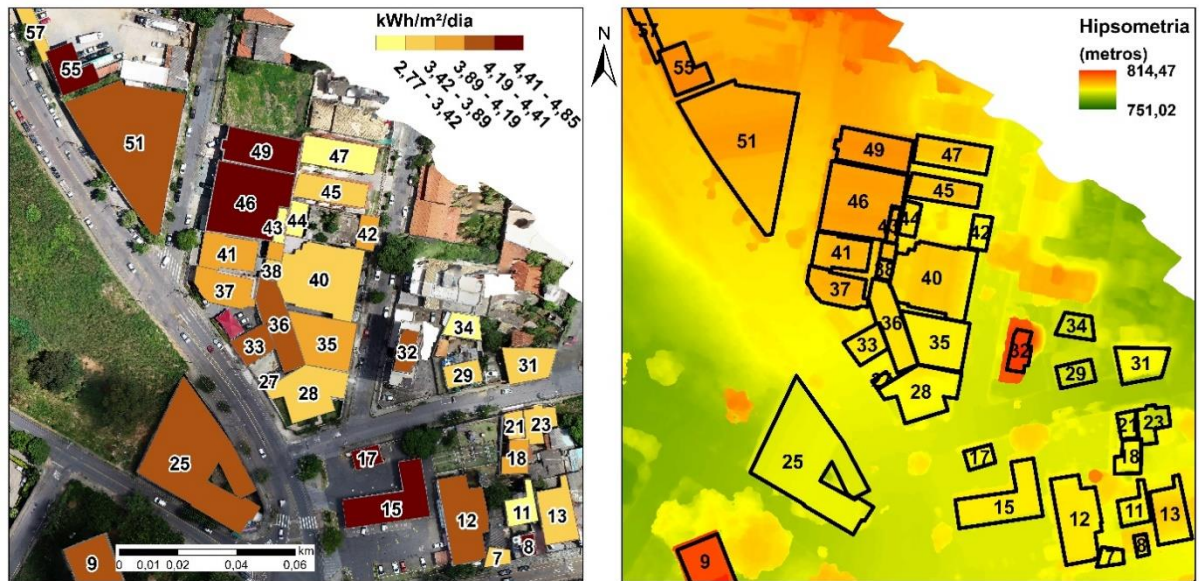


Figura 8 - Análise comparativa entre o cálculo de radiação solar e o mapa hipsométrico do setor leste do mapa de radiação solar.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resultado final do modelo de radiação solar combinou um modelo digital de superfície com o algoritmo de visada hemisférico para elaborar a quantificação do potencial de energia solar para cada telhado das edificações de uma determinada área urbana. Os resultados obtidos permitiram avaliar que, para a presente área de estudo, o potencial de radiação para cada estrutura de telhado variou de 2,77 a 4,85 kWh/m²/dia, sendo que estes resultados podem ser utilizados para conferir um valor economicamente mensurável para avaliar a rentabilidade em se produzir energia elétrica através de painéis fotovoltaicos. Essa ferramenta possibilita ao usuário final definir

Ressalva-se que a metodologia deste trabalho possui relevância para fomentar a implementação de cidades energeticamente sustentáveis, sendo necessário a análise prévia da potencial produção de energia elétrica total para todas as edificações de um município, o que pode transformar blocos, bairros ou até mesmo todo o distrito como um potencial gerador de energia elétrica para localidades que não são autossuficientes ou estão Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Destaca-se a eficiência e viabilidade econômica da utilização de drones para o levantamento dos dados de entrada necessários para a execução do processamento, além de possibilitar o levantamento do modelo digital de superfície com resolução centimétrica, o que permite quantificar a influência de pequenas estruturas de telhados como caixas d'água, antenas e chaminés que podem projetar suas sombras e reduzir a incidência de insolação sobre os

painéis fotovoltaicos instalados na estrutura da edificação. Outro fator positivo para a utilização de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) é a possibilidade de atualizar periodicamente o MDS com novas edificações que serão construídas no futuro, além de auxiliar em modelar cenários que possibilitam a expansão urbana para áreas favoráveis à produção de energia elétrica fotovoltaica.

O mapeamento de potencial de radiação para edificações pode ainda ser utilizado em conjunto à metodologias com as propostas por Palmer et al. (2018) e Szabó et al. (2016), que são utilizadas para definir à área útil dos telhados a partir de modelos digitais de superfície. Com isso é possível identificar com mais precisão o valor monetário da produção de energia elétrica para cada telhado de edificação, tendo em vista que as variáveis para este cálculo são a área útil, o potencial de radiação por m² e o valor do kWh para cada localização. Além disso, o estudo da demanda de energia elétrica por setor da cidade, aliado com os dados levantados de potencial de radiação, possibilita a análise das áreas prioritárias para a instalação de painéis solares fotovoltaicos

Por fim, o estudo de quantificação de potencial de radiação solar em ambiente urbano oferece uma metodologia rápida, eficiente e com custo benefício relevante para que cidades inteiras possam buscar a meta de atingir a sustentabilidade energética, bem como a produção de excedente de energia elétrica para outras localidades. A modelagem de potencial de radiação se mostra como uma importante metodologia para fomentar políticas públicas que buscam a distribuição descentralizada de energia elétrica, além de possibilitar a implementação de bairros com reduzida emissão de gases do efeito estufa.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. 2012. Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acessado em: 09 de maio de 2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL. 2019. Ranking das Tarifas. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>> Acessado em: 08 de maio de 2019.

Chow, A., Fung, A., & Li, S. (2014). GIS modeling of solar neighborhood potential at a fine spatiotemporal resolution. *Buildings*, 4(2), 195-206.

Falklev, E. H. (2017). Mapping of solar energy potential on Tromsøya using solar analyst in ArcGIS (Master's thesis, UiT The Arctic University of Norway).

- Falkner, R. 2016. The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs*, 92(5), 1107-1125.
- Fu, P., & Rich, P. M. 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In *Proceedings of the nineteenth annual ESRI user conference (Vol. 1, pp. 1-31)*. USA: San Diego.
- Gielen, D., Boshell, F., & Saygin, D. 2016. Climate and energy challenges for materials science. *Nature materials*, 15(2), 117.
- Kodysh, J. B., Omitaomu, O. A., Bhaduri, B. L., & Neish, B. S. (2013). Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society*, 8, 31-41.
- Palmer, D., Koumpli, E., Cole, I., Gottschalg, R., & Betts, T. (2018). A GIS-based method for identification of wide area rooftop suitability for minimum size PV systems using LiDAR data and photogrammetry. *Energies*, 11(12), 3506.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Rüther, R., de Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V. & de Souza, J. G. 2017. *Atlas brasileiro de energia solar (2ª edição)*. São José dos Campos: Inpe.
- Rich, P., Dubayah, R. C., Hetrick, W., & Saving, S. (1994). Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*. In *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (pp. 524-529)*.
- Szabó, S., Enyedi, P., Horváth, M., Kovács, Z., Burai, P., Csoknyai, T., & Szabó, G. (2016). Automated registration of potential locations for solar energy production with Light Detection And Ranging (LiDAR) and small format photogrammetry. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3820-3829.