

## Sensoriamento Remoto aplicado a identificação de potencial solar em escalas regionais

Vivian da Silva Celestino Reginato 

*Doutora em Engenharia Civil, Professora na Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. (vivian.celestino@ufsc.br)*

*Histórico do Artigo: Submetido em: 25/08/2020 – Revisado em: 26/08/2020 – Aceito em: 27/08/2020*

### RESUMO

Imagens de satélite têm sido utilizadas para muitas atividades em diferentes áreas do planeta, inclusive na busca de fontes alternativas e sustentáveis para atender a demanda crescente de energia com finalidade de diminuir a emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Uma maneira de minimizar esses efeitos e expandir o parque gerador é incentivar a geração local através do uso de fontes renováveis, como a energia solar, que é gratuita e acessível em muitas regiões do planeta. Mas para que seja tomada uma decisão assertiva no momento de instalar um sistema solar é necessário utilizar ferramentas que envolvam o sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG), realizando a compilação de informações e variáveis que sejam pertinentes ao tema de geração de energia solar e que levem em consideração o espaço geográfico inerente. Neste contexto o objetivo principal deste trabalho é desenvolver um modelo em SIG para identificar áreas com potencial solar em escala regional utilizando imagens de sensores remotos ativos e modelos solares já disponíveis. Como forma de validar o modelo foi utilizada como área de estudo a parte insular do município de Florianópolis no Estado de Santa Catarina – Brasil. Os resultados apontaram para um potencial solar alto e que pode ser explorado ao longo de todo o ano.

**Palavras-Chaves:** Energia Solar, Sensoriamento Remoto, SRTM, Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

### Remote sensing applied to regional-scale mapping of solar potential

### ABSTRACT

Satellite imagery is used for many activities in different areas of the planet, including searching for alternative and sustainable sources to meet growing energy demand to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. One way to minimize these effects and expand energy parks is to encourage local generation through the use of renewable sources, such as solar energy, which is free and affordable in many regions of the planet. But in order to make an assertive decision when installing a solar power system, one needs to use tools that involve remote sensing and geographic information systems (GIS), and compile information and variables that are relevant to the subject of solar power generation and take into account the inherent geographic space. In this context, the main objective of this work is to develop a GIS model to identify areas with solar potential on a regional scale using active remote sensor images and previously available solar models. To validate the model, this study used an area on the island part of the city of Florianópolis in Santa Catarina State - Brazil. The results pointed to a high solar potential that can be exploited throughout the year.

**Keywords:** Solar Energy, Remote Sensing, SRTM, Geographic Information Systems (GIS).

Reginato, V. S. C. (2020). Sensoriamento remoto aplicado à identificação de potencial solar em escalas regionais. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.1, n.2, p.11-28.



Direitos do Autor. A revista utiliza a licença *Creative Commons* - CC Atribuição Não Comercial 4.0 CC-BY-NC.

## 1. Introdução

Em 1957, um objeto terrestre, construído pela mão do homem, foi lançado ao universo, onde durante algumas semanas girou em torno da Terra segundo as mesmas leis de gravitação que governam o movimento dos corpos celestes – o Sol, a Lua e as estrelas. É verdade que o satélite artificial não era nem lua nem estrela; não era um corpo celeste que pudesse prosseguir em sua órbita circular por um período de tempo que, para nós, mortais limitados ao tempo da Terra, durasse uma eternidade (Arendt, 2000). Hannah Arendt se referia ao Sputnik, primeiro satélite artificial colocado em órbita no mundo e que abriu caminho para a nova tecnologia denominada Sensoriamento Remoto, que é a arte e a ciência de obter informações sobre um objeto sem estar em contato físico direto com ele. Utiliza como princípio físico para a captação a energia eletromagnética emitida ou refletida pelos alvos. O sistema mais antigo utilizado para essa captação é a câmera fotográfica, invenção concretizada no século XIX (Jensen, 2011). A partir da fotografia surgiram as plataformas aéreas (balões, pipas, foguetes, aeronaves, entre outros).

De acordo com Arendt (2000) a situação criada pelas ciências tem grande significado político, tanto que o reconhecimento fotográfico da Terra foi originado durante as 1ª e 2ª guerras mundiais e permanecem até os dias de hoje. De acordo com Jensen (2011) a corrida armamentista entre Estados Unidos (EUA) e União Soviética (URSS) ocorrida durante a guerra fria deu ênfase ao desenvolvimento de tecnologias para coleta de informações para espionagem do arsenal bélico do inimigo. Essa corrida revolucionou o conceito de guerra, resultando, de acordo com Hardt e Negri (2004) em uma assimetria nos combates pós-modernos, e os americanos vêm demonstrando, desde então, a vasta superioridade de suas armas e satélites, cujo maior expoente é a constelação *Global Positioning System* (GPS), operante desde a década de 90.

Imagens de Sensoriamento Remoto, disponibilizadas gratuitamente, têm sido utilizadas em favor da paz, nos ramos da ciência, educação e tecnologia em diversos países. São exemplos as advindas de sensores ativos da *Space Shuttle Topography Mission* (SRTM) e as advindas de sensores passivos como da série *Landsat*. Tais imagens são ferramentas/recursos fundamentais para que os analistas identifiquem problemas, visualizem panoramas e proponham alternativas políticas viáveis para tomada de decisão em gestão territorial.

Robert Cowell, Engenheiro Florestal americano, ao perceber o potencial das imagens de satélites, desenvolveu durante a década de 1960 o conceito “multi” como método científico útil e preciso de interpretação de imagem através do desenvolvimento de quatro tipos de análises: multiespectral, multidisciplinar, multiescala e multitemporal. Desde então as análises de imagem têm envolvido o uso de diversas cenas, escalas, equipes, épocas e qualidades, mas todas são realizadas levando em consideração as mudanças ocorridas no espaço e/ou no tempo e permitem, também, a realização de prognósticos, onde perceber os impactos da intervenção antrópica se faz primordial.

Na era contemporânea onde a humanidade se multiplica e utiliza cada vez mais energia, é urgente e contingente progredir sem perder de vista a preservação dos recursos naturais. Encontrar alternativas que utilizem fontes renováveis de energia, além de necessário, é vital para a preservação dos seres vivos, pois os impactos ambientais causados pelas emissões de gases de efeito estufa são irreversíveis, sendo o aumento do buraco na camada de ozônio, o aquecimento global, o derretimento das calotas polares e as mudanças climáticas, somente alguns exemplos notáveis.

Diversas fontes de energia podem ser utilizadas como alternativas ao uso de energias poluentes. Essas energias, consideradas renováveis, ou suaves, como preferem alguns autores, como Lovins (1997), são “aquelas originadas na natureza, como energia solar, eólica, oceânica ou geotérmica, usadas localmente e de forma híbrida para evitar custos de energia e despesas de transporte”.

Para permitir a visualização de cenários futuros em espaços físicos e colaborar no processo decisório atual na identificação de potencial de energias renováveis os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido utilizados como ferramentas em diversas escalas, níveis de abstração e espacialização de fenômenos, onde os advindos de natureza abstrata, como temperatura e radiação solar, são alguns exemplos.

Os atlas solarimétricos produzidos e os modelos de radiação solar já desenvolvidos e disponíveis no mercado são exemplos de aplicações que utilizaram SIG na sua produção. Porém, tanto os atlas (por possuírem escala pequena) quanto os modelos de radiação (por serem mais precisos na identificação pontual) não suprem a necessidade de investigação de potencial solar a ser aplicado em escalas regionais (modelos que possam ser aplicados a municípios, por exemplo). É necessária uma nova geração de modelos espaciais que combinem as respectivas vantagens dos modelos de radiação solar pontuais com a visualização de pequenas escalas dos atlas, para proporcionar rapidez e precisão aos modelos de insolação/radiação em escalas regionais.

Mas para que seja tomada uma decisão assertiva, em relação à definição de áreas com potencial para gerar energia por fonte solar de forma regional, é necessário verificar quais são as premissas fundamentais para que esse potencial exista, como, por exemplo, o relevo e o aspecto adequado. As técnicas mais indicadas para realizar essas análises ainda incluem o uso de produtos, como imagens advindas de Sensoriamento Remoto e/ou fotogrametria quanto ferramentas SIG, primeiro, para gerar modelos digitais e, segundo, para realizar a análise espacial destes. Tal análise se faz necessária para que as informações, advindas da superfície terrestre e do meio ambiente quando espacializadas geograficamente, se transformem em um conhecimento que permita a tomada de decisão assertiva.

Neste contexto o objetivo principal deste trabalho é desenvolver um modelo em SIG para identificar áreas com potencial solar em escala regional utilizando imagens de sensores remotos ativos e modelos solares já disponíveis.

## 2. Conceituação Teórica

Neste capítulo serão apresentados os conceitos principais relativos ao assunto da pesquisa como: sensoriamento remoto e energias renováveis. Também serão apresentados o atual estado da arte das aplicações SIG nas Energias Renováveis e nos Modelos de Insolação/Radiação Espacial.

### 2.1 Sensoriamento Remoto

De forma geral, os sistemas multiespectrais de Sensoriamento Remoto registram a energia refletida ou emitida de um objeto ou área de interesse em múltiplas bandas do espectro eletromagnético. Atualmente esses sistemas coletam dados em formato digital. Os sistemas sensores são dispositivos capazes de detectar e registrar a Radiação Eletromagnética (REM), em determinada faixa do espectro eletromagnético, e gerar dados que são transformados em produto passível de interpretação. São constituídos basicamente por um coletor, um sistema de registro e um sistema processador (Moreira, 2003).

Os sensores orbitais são classificados, em relação à REM, em passivos e ativos. De acordo com Moreira (2003), os passivos operam no espectro entre o visível e o infravermelho termal e registram/captam a REM que é refletida/emitida pelos alvos da superfície terrestre.

Os sistemas ativos geram a própria REM, que é transmitida do sensor para a superfície do terreno, interage com os alvos produzindo um retroespalhamento da energia e que é registrada pelo receptor do sensor remoto. Os sistemas de sensoriamento remoto ativos mais amplamente utilizados incluem, de acordo com Jensen (2011), as micro-ondas ativas dos tipos *Light Detection and Ranging* (LIDAR), *Sound, Navigation and Ranging* (SONAR) e *Radio Detection And Ranging* (RADAR). O sistema RADAR funciona emitindo feixes de REM (ondas de rádio) em uma determinada banda de frequência e quando atingem um objeto são refletidos de volta criando um eco que a antena do radar pode detectar (Moreira, 2003).

O RADAR é um sistema baseado na transmissão de micro-ondas de comprimentos mais longos (3 – 25 cm) através da atmosfera e na detecção da quantidade de energia retroespalhada pela superfície do terreno. Os dados interferométricos obtidos por *Synthetic Aperture Radar* (SAR) podem, muitas vezes, fornecer informação topográfica tridimensional que são tão precisas quanto os modelos de elevação digital obtidos pelas

técnicas fotogramétricas tradicionais. A vantagem é que a interferometria pode operar através de nuvens, durante a noite e em locais altamente florestados. O imageamento interferométrico por radar é o processo pelo qual as imagens de radar de um mesmo local no terreno são registradas por antenas em diferentes localizações ou em tempos diferentes (Jensen, 2011).

A Missão Topográfica por Radar do Ônibus Espacial SRTM da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) foi lançada em 11 de fevereiro de 2000 num período de 11 dias. Foram usados radares SAR nas bandas C e X para adquirir dados topográficos da área emersa da Terra, entre 60° Norte e 56° Sul.

O SRTM mapeou, pelo menos uma vez, 99,97 % da área alvo (119.000.000 km<sup>2</sup>). Modelos Digitais de Elevação (MDE) derivados do SRTM de grande parte do planeta, estão agora, disponíveis com uma resolução espacial de 3'' (90 m). No entanto, uma considerável quantidade de dados já foi processada para uma resolução de 30 m (JPL, 2019).

O datum horizontal do SRTM é o *World Geodetic System* of 1984 (WGS 84) e o Datum Vertical é o *Earth Gravitational Model* of 1996 (EGM 96). De acordo com Chien (2000) e Rabus et al. (2003), os dados da banda C oriundos da missão SRTM, com resolução espacial de 90 metros, tem uma acurácia vertical e horizontal absoluta de 16 e 20 m, respectivamente, com 90% de confiança.

## 2.2 Energias Renováveis ou Suaves

São consideradas energias renováveis ou suaves todas aquelas que utilizam as forças da natureza para gerar energia sem agredir o meio ambiente e sem grandes sistemas logísticos para transportar a energia gerada. Lovins (1997) destaca que o processo da geração da energia, até o consumo final, deve percorrer um caminho sustentável, portanto, suave:

O "caminho suave da energia" pressupõe que a energia é apenas um meio para fins sociais e não é um fim em si mesmo. Caminhos de energia suave envolvem uso eficiente de energia, diversidade de métodos de produção de energia (combinados em escala e qualidade para usos finais) e dependência especial de cogeração e "tecnologias de energia suave" como energia solar, energia eólica, biocombustíveis, energia geotérmica, energia das ondas, a energia das marés, etc. (Lovins, 1997).

Dentre as energias renováveis, a energia hidrelétrica é a principal aliada na geração limpa, autóctone e inesgotável, constituindo uma das principais fontes de eletricidade, porém, apresentam um risco ligado à sua dimensão (ONU, 2013). O banco mundial desde 1997 nos seus relatórios ambientais pronuncia-se contra as grandes barragens por serem econômica e ambientalmente um desperdício.

A energia dos ventos é considerada uma fonte renovável, amplamente disponível, limpa e com baixo impacto ambiental, principalmente por não emitir resíduos como gás carbônico (ANEEL, 2008). No entanto, boa parte do território brasileiro, incluindo praticamente toda a região amazônica e central do Brasil, não apresenta condição de vento adequada para geração de eletricidade, pois necessita que existam condições naturais específicas e favoráveis e, a avaliação destas condições – ou do potencial eólico de determinada região – requer trabalhos sistemáticos de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime dos ventos, ou seja, torres anemométricas captando dados e que estejam dispostas em diferentes locais (CEPEL, 2001 e ANEEL, 2008).

De acordo com Eloy (2009) a energia solar é uma fonte inesgotável, livre e não poluente, pois o sol atinge a Terra em formas térmicas e luminosas, porém a captação desta radiação é variável de acordo com o local, pois depende da latitude, da estação do ano e de condições atmosféricas diversas como nebulosidade e umidade relativa.

Ao passar pela atmosfera da Terra, a radiação se manifesta sob a forma de luz visível, raios infravermelhos e ultravioleta. Esta luz pode ser capturada e transformada em calor. Se uma superfície escura for usada para captura, a energia solar será transformada em calor e, se forem usadas células fotovoltaicas, o

resultado será eletricidade (ANEEL, 2008).

Um sistema fotovoltaico, por exemplo, não precisa do brilho do sol para operar, também pode gerar eletricidade em dias nublados. Isso porque a energia excedente gerada disponibilizada na rede funciona como um crédito que pode ser utilizado pelo consumidor quando a energia solar não estiver disponível.

A taxa de crescimento da energia fotovoltaica instalada nos últimos anos excedeu todas as previsões, mostrando assim o potencial desta tecnologia como fonte de energia em todo o mundo. É importante ressaltar que a maior parte da capacidade instalada corresponde a instalações conectadas à rede, representando 98% da capacidade global, embora haja um interesse recente em instalações isoladas e sistemas de pequena escala, principalmente em áreas remotas, difíceis de acessar (ONUDI, 2013). De acordo com a Rede de Políticas de Energia Renovável para o Século XXI (REN21), os sistemas fotovoltaicos conectados à rede foram a tecnologia de geração que cresceram mais rapidamente no mundo em 2006 e 2007 (ANEEL, 2008).

O Brasil, por ser um país localizado majoritariamente na região intertropical, possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo o ano (Tiba, 2000) e (Colle & Pereira, 1998), onde são utilizados os sistemas térmico e fotovoltaico. Devido a características climáticas, o primeiro é mais indicado de ser explorado nas regiões Sul e Sudeste do país, e o segundo, nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica.

Esse potencial foi verificado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) quando da publicação, no ano de 2006, do Atlas Brasileiro de Energia Solar, cuja publicação se deu através do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA), do Projeto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), financiamento do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e cofinanciamento do Fundo Global para o Meio Ambiente. O Atlas disponibiliza dados de energia solar para todo o território brasileiro e foi produzido utilizando modelo de transferência radiativa, foi alimentado por dados climatológicos e 10 anos de informações extraídas de imagens de satélite geostacionário e validado por dados coletados em estações de superfície (Pereira et al., 2006).

Através de técnicas de Geoprocessamento os dados de Irradiação Solar Global Horizontal – média anual para o ano de 2006 – do Atlas Brasileiro de Energia Solar, podem ser acessados pelos interessados. Porém, por se tratar de um produto de abrangência espacial muito grande, possui suas limitações no tocante a escala e exatidão, não sendo indicado para identificar o potencial solar de forma regional ou local.

Segundo Santos et al. (2014), a radiação solar incidente pode ser medida por estações meteorológicas terrestres, por satélites meteorológicos e/ou estimada por meio de modelos. Existem vários modelos solares disponíveis na literatura, que variam em detalhes acerca dos parâmetros de entrada e, conseqüentemente, no mapa de saída. Os dois exemplos de modelos de radiação solar mais utilizados são o *Solar Analyst* do ArcGIS (Fu & Rich, 1999/2000) e o Sistema de Informação Geográfica Fotovoltaica (PVGIS) (Šúri, Huld & Dunlop, 2005).

### 2.3 O SIG nas Energias Renováveis e os Modelos de Insolação Espacial

Para associar fenômenos qualitativos e quantitativos advindos da superfície terrestre, sejam eles de características discretas, contínuas ou abstratas e transformá-los em conhecimento possível de ser analisado e permitir a tomada de decisão em gestão territorial, atualmente, a ferramenta mais utilizada envolve SIG, pois as soluções apresentadas garantem um resultado de qualidade, possibilidade de mensuração e avaliação da qualidade, além de reduções consideráveis de custo e tempo. Os SIG são um conjunto/sistema de *hardware*, *software* e procedimentos concebidos para apoiar o recolhimento, a gestão, a análise, a modelagem e a visualização de dados georreferenciados para solucionar problemas de planejamento e de gestão (Mendes, 2013).

A modelagem geográfica é um dos principais passos do SIG e ganhou relevância nos últimos anos, como resultado de desenvolvimentos metodológicos e tecnológicos. Por um lado, Geografia, Cartografia e outras

ciências relacionadas à Terra desenvolveram ferramentas analíticas e, por outro lado, componentes de *hardware* e *software* também evoluíram substancialmente permitindo as análises espaciais. Simultaneamente, a existência de diversos projetos de produção e disponibilização de dados complementou a oferta e forneceu suporte para implementação e teste de diversos modelos.

Modelos de insolação espacial também são modelos geográficos e podem ser categorizados em dois tipos: baseados em ponto específico e baseados em área. Modelos específicos de ponto calculam a insolação para uma localização baseada na geometria da orientação da superfície e do céu visível. O efeito local da topografia é explicado por relações empíricas, por estimativa visual ou, mais precisamente, pelo auxílio de imagens hemisféricas voltadas para cima (The Solar Analyst 1.0, 1999 - 2000).

Modelos específicos de ponto podem ser altamente precisos para um determinado local, mas não é viável construir um modelo específico para cada local em uma região. Em contrapartida, os modelos baseados em área calculam a insolação para uma área geográfica, calculam a orientação da superfície e os efeitos de sombra a partir de um MDE. Esses modelos fornecem ferramentas importantes para entender os processos da região.

O modelo *SolarFlux* (Hetrick et al. 1993, Hetrick, Rich & Weiss, 1993 and Rich, Hetrick & Saving, 1995), desenvolvido para uso na plataforma ARC/INFO GIS da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), simula a influência dos padrões de sombra sobre insolação direta usando a função *Hillshade* em intervalos discretos ao longo do tempo.

O modelo *Solar Analyst* baseia-se nos pontos fortes dos modelos baseados em pontos específicos e em áreas. Em particular, ele gera uma visão hemisférica voltada para cima, produzindo na essência o equivalente a uma fotografia hemisférica (olho de peixe) (Rich 1989, 1990) para cada localização em um MDE. As vistas hemisféricas são usadas para calcular a insolação para cada local e produzir um mapa de insolação preciso. Calcula a insolação integrada para qualquer período de tempo utilizando a latitude e elevação do local, a orientação da superfície (aspecto), sombras projetadas pela topografia circundante, mudanças diárias e sazonais no ângulo solar e atenuação atmosférica. Ele é implementado como uma extensão do ArcGIS.

De acordo com o site Europa.eu (2019), o PVGIS fornece acesso gratuito e aberto na internet para dados de radiação solar e temperatura para avaliação de desempenho de potencial fotovoltaico. Possui como funcionalidades: potencial fotovoltaico; radiação solar e temperatura; séries temporais completas de valores horários de radiação solar e desempenho fotovoltaico; dados do ano meteorológico típico para nove variáveis climáticas; mapas, por país ou região, de recursos solares e potencial fotovoltaico prontos para impressão. Sobre a cobertura geográfica, contém diferentes bases de dados de radiação solar (baseadas em dados de satélite e produtos de reanálise), cobrindo todo o território terrestre. Também disponibiliza mapas prontos para impressão do potencial solar e fotovoltaico, em formatos PDF e PNG para regiões e países individuais.

Vários estudos foram realizados para incluir a modelagem geográfica em atividades de planejamento e decisões de múltiplos propósitos, não apenas aquelas envolvendo estruturas de banco de dados. A fim de esclarecer processos de decisão que envolvem vários projetos e problemas que requerem uma solução espacializada, a adaptação de modelos de SIG tem sido realidade na busca por alternativas na geração de energia. Ver em Julião e Celestino (2016) e Reginato e Julião (2019) os resultados que envolvem, em um mesmo modelo (que vai do conceitual ao físico), a identificação de duas a até três fontes de energias renováveis para uma determinada região de Portugal Continental utilizando imagens advindas do SRTM. Nestes trabalhos, especificamente para identificação de potencial solar, foi utilizado o modelo *Solar Analyst* e, para a identificação de potencial para as demais fontes (hídrica e eólica), foram utilizadas informações advindas de estações meteorológicas e cartas de uso e ocupação do solo.

### 3. Definição e Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo definida (Figura 1) abrange a maior ilha da parte insular do Município de Florianópolis e conta com 421,23 km<sup>2</sup>. Situa-se no oceano Atlântico, no centro do litoral do Estado de Santa Catarina -

Brasil, na latitude 27° Sul e longitude 48° Oeste.

A Ilha de Florianópolis possui uma forma alongada e estreita, com comprimento médio de 55 km e largura média de 18 km. Com litoral bastante recortado, possui várias enseadas, pontas, ilhas, baías e lagoas. Está situada de forma paralela ao continente, separada por um estreito canal. Seu relevo é formado por cristas montanhosas e descontínuas, servindo como divisor de águas. O ponto mais alto é o morro do Ribeirão, com 532 m de altitude. Paralelamente às montanhas, surgem esparsas planícies na direção leste e na porção noroeste. Na face leste da ilha, há presença de dunas formadas pela ação do vento (Monteiro, 1991).

Em relação ao clima, segundo a classificação climática de Koeppen (1996) que analisa, simultaneamente, a temperatura e a precipitação, é considerado Mesotérmico úmido, com verões quentes, invernos frios e umidade durante o ano todo. Já de acordo com a classificação climática de Strahler (1986), que se baseia nos controles climáticos e nas características das precipitações sobre os lugares, o clima é considerado Subtropical Úmido, controlado pelas massas de ar tropicais e massas de ar polares, com chuvas abundantes durante todo o ano, com as máximas ocorrendo no verão, principalmente em janeiro.

No tocante aos ventos, segundo dados do Centro Integrado de Meteorologia e Recursos Hídricos de Santa Catarina (CLIMERH), nos últimos 80 anos aconteceu à predominância de ventos norte (36,9%), seguido pelos ventos de sudeste (16,9%), ventos sul (15,7%), ventos nordeste (10,0%), ventos noroeste (2,8%) e ventos sudoeste (1,1%).

Os ventos predominantes em Florianópolis sopram do quadrante norte, com velocidade média de 3,5 m/s, porém os mais velozes sopram do sul com velocidades médias de 10m/s. Os ventos sul antecedem a entrada de frentes frias e apresentam rajadas que chegam até a 22m/s (Monteiro, 1991).

Já sobre as temperaturas, a média registrada pela Estação Climatológica Principal e Sinótica de Florianópolis, durante o período de 1911 a 2009 foi de 20,6 °C, tendo sido registrado como trimestre de maiores temperaturas médias (janeiro, fevereiro e março) com 24,5 °C, e o de menores temperaturas médias aquele formado pelos meses de junho, julho e agosto, com 17,6 °C. Acerca da vegetação possui uma variedade muito grande por se situar em zona costeira.

Originalmente “o território da Ilha tinha 90% de sua área coberta por vegetação, sendo 74% desta vegetação a Mata Atlântica, 9% os manguezais, 7% a vegetação de praia, duna e restinga, e o restante ocupado por dunas sem vegetação (4%) e por lagoas (6%)”. Entretanto, devido a contínua implantação de áreas para formação de núcleos residenciais, principalmente, a vegetação foi devastada em diversas áreas (Debetir & Orth, 2007). A Ilha apresenta uma biogeografia peculiar com diversos ecossistemas: mangues, restingas, lagoas, dunas, praias, costões rochosos, florestas. Cada um deles possui função vital no equilíbrio ecológico e na manutenção da qualidade de vida e por isso muitas são instituídas legalmente como Unidades de Conservação (UC). Existem 13 UC na Ilha: 7 parques, 1 reserva extrativista, 1 reserva particular do patrimônio natural, 1 área de proteção ambiental, 2 monumentos ambientais e 1 estação ecológica (Debetir & Orth, 2007).

Ao relação à geração e consumo de energia por fontes renováveis não existem dados suficientes para realizar um quantitativo que apresente a real situação da Ilha de Florianópolis. Em relação à energia por fonte eólica, se sabe, *a priori*, que, para sua viabilidade devem existir condições que não são verificadas na maioria dos municípios brasileiros, inclusive, Florianópolis, que possui grandes áreas de vegetação, morros e também eventos climáticos extremos como ciclones extratropicais que inviabilizam a construção de parques eólicos, por exemplo. O potencial para inserção de usinas isoladas em residências deve ser investigado, mas faltam dados advindos de estações meteorológicas em diferentes alturas de captação de vento para identificar esse possível potencial eólico, o que não existe em número suficiente em Florianópolis. O único dado relativo à velocidade média de vento aponta para um valor de apenas 3,5 m/s de forma inconstante, de acordo com Monteiro (1991), não sendo considerado suficiente para garantir o potencial mínimo de 3,6 m/s apontado por Eloy (2006).

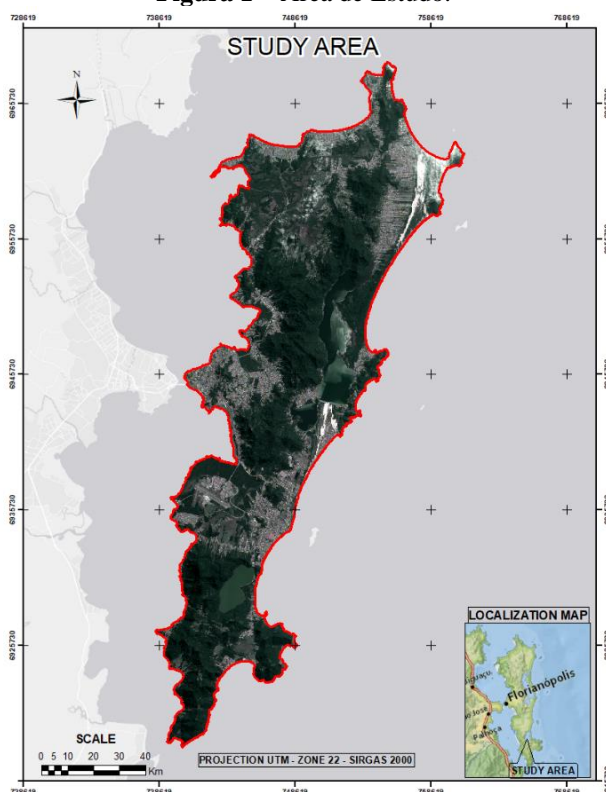
A energia gerada por fonte hídrica, mesmo em pequeno formato, necessita de um relevo apropriado e de grandes áreas de terra para realizar o alague (obter a altura de queda da água suficiente para gerar energia

potencial). Não é, portanto, indicada para ser explorada em cidades ou áreas de preservação ambiental, por isso não se faz presente na Ilha de Florianópolis.

Em relação a energia solar, alguns fatores influenciam na retenção da energia solar sob a superfície, como os geográficos (relevo e aspecto) e climáticos (dinâmica atmosférica, maritimidade e continentalidade). Os municípios de maior retenção solar sob superfície encontram-se afastados do litoral. Mas ao analisar os dados disponibilizados pelo Atlas Solar para a Ilha de Florianópolis, percebe-se a existência de radiação solar global absoluta entre 4500 wh/m<sup>2</sup> e 4700 wh/m<sup>2</sup> (*watt hora por metro quadrado*) (Pereira et al., 2006).

Percebe-se que a energia solar fotovoltaica é explorada em residências e em algumas empresas, como a Eletrosul, bem como em projetos de pesquisa onde a UFSC Fotovoltaica é um exemplo. A energia solar térmica também é explorada em residências.

**Figura 1 – Área de Estudo.**



#### 4. Material e Métodos

Para desenvolver o método proposto, primeiramente, foi necessário realizar pesquisas em diferentes fontes bibliográficas e definir qual a matriz de energia (por fonte renovável) seria utilizada, levando em consideração as necessidades da Ilha de Florianópolis. Verificou-se que a energia por fonte solar era a mais indicada para ser pesquisada, devido a sua disponibilidade, localização geográfica privilegiada, não necessidade de transporte/logística para o uso e pouca utilização.

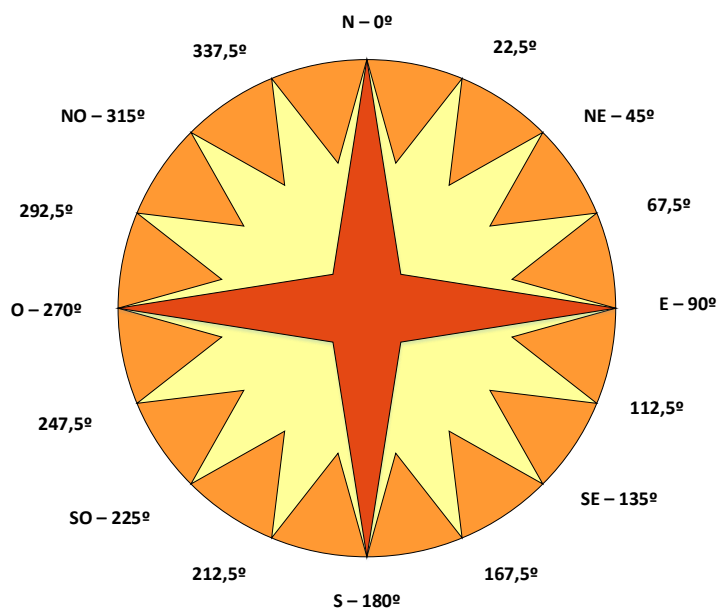
O segundo passo foi identificar quais informações e produtos convencionais e cartográficos primários seriam considerados fundamentais para gerar informações secundárias para identificar o potencial de energia por fonte solar, bem como verificar a disponibilidade dos mesmos de forma gratuita e digital. Foi definido como software de SIG para desenvolver o modelo o ArcGIS da ESRI.



Considerou-se fundamental a utilização de um MDE, donde poderiam ser derivadas as informações de altitude, inclinação, declividade para gerar o potencial solar por aspecto da superfície mapeada. O MDE utilizado como dado de entrada para gerar o potencial solar por aspecto foi um mosaico de imagens SRTM com 30 m de *pixel*.

Para estimar o potencial solar por aspecto foram definidos pesos para os diferentes caminhamentos do sol aplicados à região de estudo (considerando a localização geográfica da Ilha de Florianópolis) através de *Analytic Hierarchy Process* (AHP). As regiões de relevo plano (com aspecto voltado para cima ou *flat*) possuem um potencial excelente para captação solar, por isso receberam peso 5. As faces voltadas para o norte, por possuírem potencial altíssimo, receberam peso 4. As faces voltadas para o nordeste e noroeste, por possuírem potencial alto, receberam peso 3. As faces voltadas para o leste e oeste, por possuírem potencial médio, receberam peso 2. As faces voltadas para o sudeste e sudoeste, por possuírem potencial baixo, receberam peso 1 e as faces voltadas para o sul, por possuírem potencial nulo (não recebem insolação durante todo o ano), receberam peso 0. Ver detalhes desta definição na rosa dos ventos da Figura 2 e também na Tabela 1.

**Figura 2 – Rosa dos Ventos**



**Tabela 1 - Pesos por potencial e aspecto (faces de sol) da área de estudo**

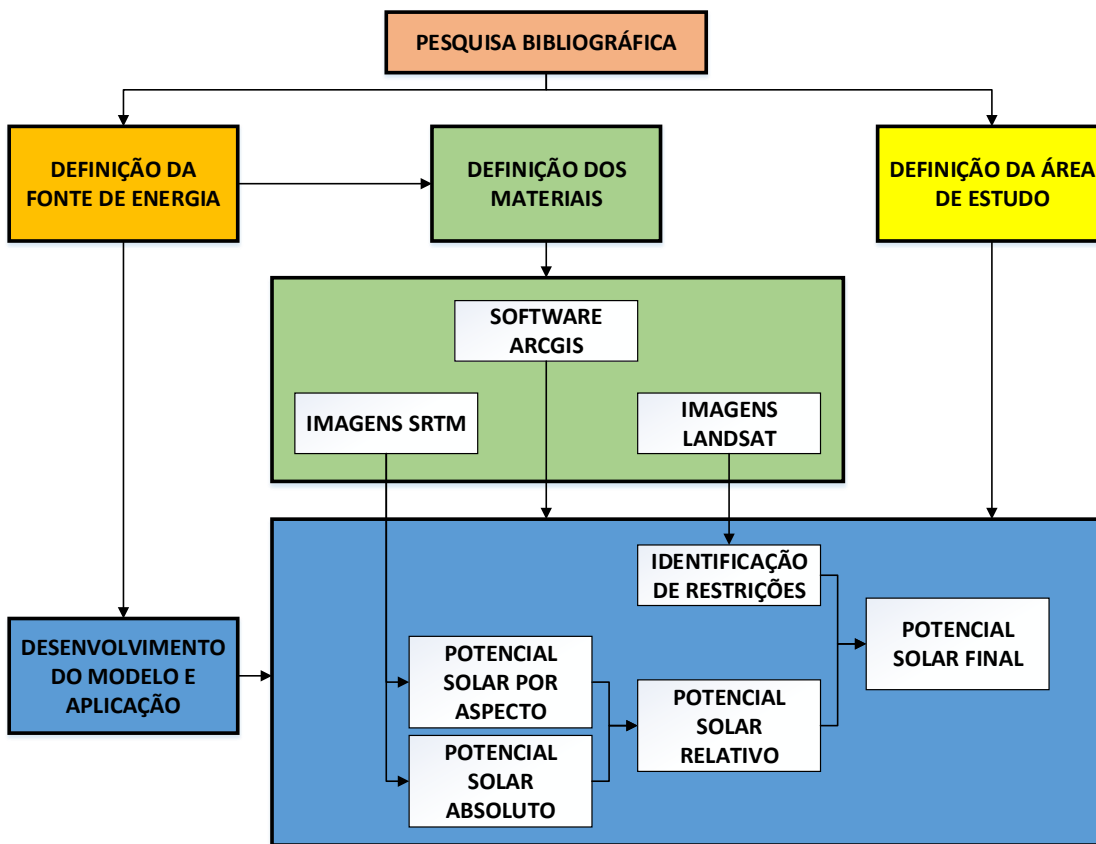
Aspecto/Faces de Sol	Potencial	Orientação ao Sol	Peso
Flat	Excelente	-1°	5
Norte	Altíssimo	337,5° a 360° e 0° a 22,5°	4
Nordeste	Alto	22,5° a 67,5°	3
Noroeste	Alto	292,5° a 337,5°	3
Oeste	Médio	247,5° a 292,5°	2
Leste	Médio	67,5° a 112,5°	2
Sudeste	Baixo	112,5° a 167,5°	1
Sudoeste	Baixo	212,5° a 247,5°	1
Sul	Nulo	167,5° a 212,5°	0

Também verificou-se a necessidade de obter informações a respeito do uso e ocupação do solo, que poderiam advir tanto de classificações supervisionadas de imagens de satélite, quanto de restituição aerofotogramétrica ou de bases cartográficas temáticas, para definir as restrições que devem ser levadas em consideração no mapeamento de potencial energético solar, como as UC, por exemplo. A partir desta definição foi utilizado mosaicos de imagens LandSat 8 da *United States Geological Survey* (USGS) com 30 m de *pixel*, fusionadas a partir das bandas vermelho, verde e pancromática com resolução final de 15 m e após foi realizada classificação supervisionada para extrair 6 classes de uso e ocupação do solo (vegetação arbórea, vegetação arbustiva, urbano, solo exposto, dunas e campo), sendo considerada mais importante para definir as restrições, a classe de vegetação arbórea por se correlacionar com a mata nativa da região. Foram consideradas como áreas restritas as 13 UC identificadas em Florianópolis já listadas no item 3. Assim, essas áreas, após rasterização para um pixel de 15 m formaram mais uma classe de restrição denominada UC.

Foi definido para construir o modelo de SIG a ferramenta ModelBuilder e para calcular a radiação global da área de estudo a função *Area Solar Radiation*, ambas do ArcGIS. A função *Area Solar Radiation* também utiliza como dado de entrada um MDE. Para tanto foi utilizado o mesmo mosaico de imagens SRTM com 30 m de resolução utilizado na geração do potencial por aspecto. Foram inseridos como parâmetros de entrada: o ano de 2019; 14 h de radiação diária; frequência de 30 minutos; latitude geográfica média de 27,5° S; resolução do *sky size* de 200; fator de difusão 0,3; transmissividade de 0,5 e; tipo de modelo de difusão céu uniforme. A radiação calculada global retorna o valor total acumulado no ano, então foi realizado cálculo para obter o valor médio diário da radiação em  $\text{kwh/m}^2$  utilizando a calculadora *raster calculator*. Foram obtidos valores diários globais médios absolutos (radiação absoluta).

Para melhor representação da realidade do potencial solar da área de estudo, multiplicou-se o potencial solar por aspecto pelos valores diários globais médios absolutos (radiação absoluta), o que gerou os valores de potencial solar relativo. Para investigação do potencial solar final ainda foi multiplicado como valor nulo (peso 0), a restrição relativa à vegetação arbórea (fortemente correlacionada à ocorrência de Área de Proteção Permanente (APP)) e também a classe UC. Nenhum outro tipo de restrição foi considerada porque, *a priori*, painéis solares podem ser instalados em ambientes urbanos (telhados), bem como, inclusive, em reservatórios de água. No final foi possível identificar as áreas com potencial para gerar energia pela fonte solar para a região da Ilha de Florianópolis. Ver o fluxograma dos materiais e métodos utilizados na figura 3.

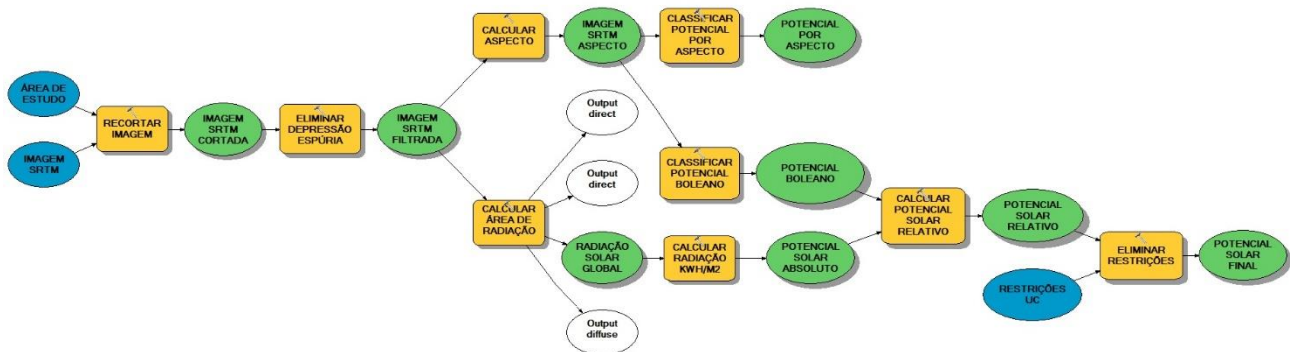
Figura 3 –Materiais e Métodos



## 5. Resultados e Discussão

O desenvolvimento do modelo e sua aplicação permitiu apresentar resultados em dois planos distintos: a aplicação em *Modelbuilder* onde foi produzido o fluxo para a identificação de áreas com potencial solar (ver figura 4) e a produção de mapas identificando as áreas com potencial para gerar energia pela fonte renovável solar.

Figura 4 - Aplicação do Modelo

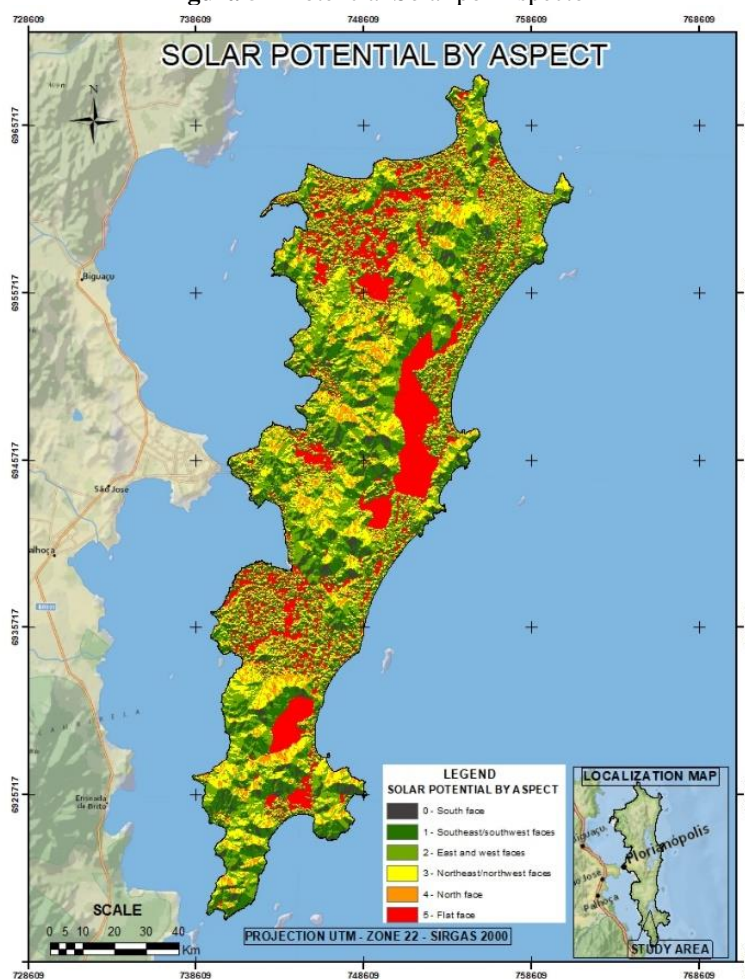


Na Tabela 2 e na Figura 5 pode ser verificado o quantitativo do potencial solar por aspecto geográfico da área de estudo.

**Tabela 2 – Potencial solar por aspecto**

Aspecto/Faces de Sol	Potencial	Peso	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Flat	Excelente	5	33,24	7,89
Norte	Altíssimo	4	90,32	21,44
Nordeste/Noroeste	Alto	3	112,05	26,60
Oeste/Leste	Médio	2	88,30	20,96
Sudeste/Sudoeste	Baixo	1	31,33	7,44
Sul	Nulo	0	65,98	15,66
Total	-	-	421,23	100

**Figura 5 – Potencial Solar por Aspecto**

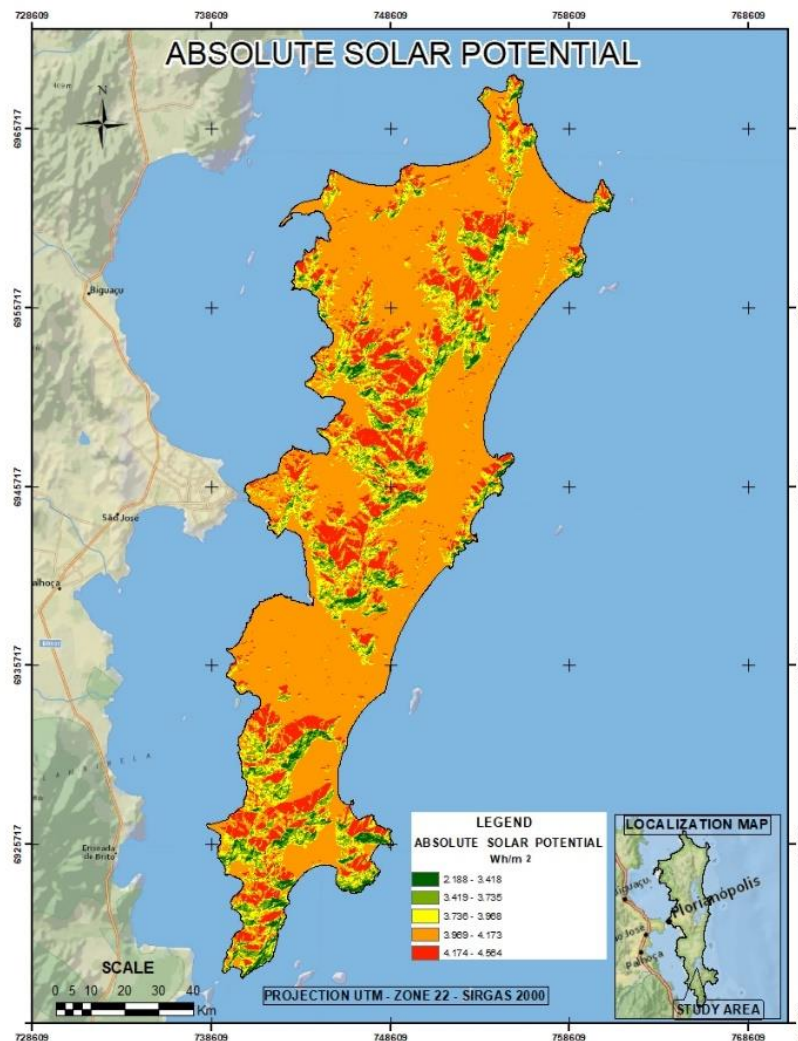


De acordo com os resultados apresentados no Tabela 2 e na Figura 5, aproximadamente 84% da região investigada possui algum potencial solar *a priori* devido ao seu posicionamento em relação ao sol, com

potencial solar por aspecto enquadrado entre baixo e excelente. A face voltada para sul corresponde a 15,66% da área e não possui potencial solar. *A priori*, as faces de sol *flat* e orientadas a noroeste, nordeste e norte, correspondem aos maiores potenciais atribuídos, resultando em 55,93% do total da área, ou seja área possui potencial solar por aspecto entre alto e excelente. 28,4% da área pesquisada possui também potencial, porém, entre baixo e médio. Merece destaque a orientação a Norte, Nordeste e Noroeste que corresponde a 48% do total da área, devido a localização geográfica da Ilha de Florianópolis.

Após o cálculo do potencial por aspecto foi calculada, a partir da ferramenta “Area Solar Radiation” do ArcGIS, a radiação global absoluta acumulada para o ano de 2019. A seguir, através da ferramenta “Raster Calculator”, calculou-se o valor médio diário da radiação em  $\text{wh/m}^2$  para o ano de 2019, o que resultou nos valores entre 2.188 e 4.564  $\text{wh/m}^2$ . Ver o mapa na Figura 6 e a descrição dos resultados na Tabela 3, onde pode ser verificado que a função utilizada para calcular a radiação global utiliza a área como um todo e não leva em consideração as faces de sol. De acordo com este resultado toda a área possui potencial solar entre 2,188 e 4,564  $\text{wh/m}^2$ , o que não corresponde à realidade.

**Figura 6** – Potencial solar absoluto – Média diária para o ano de 2019

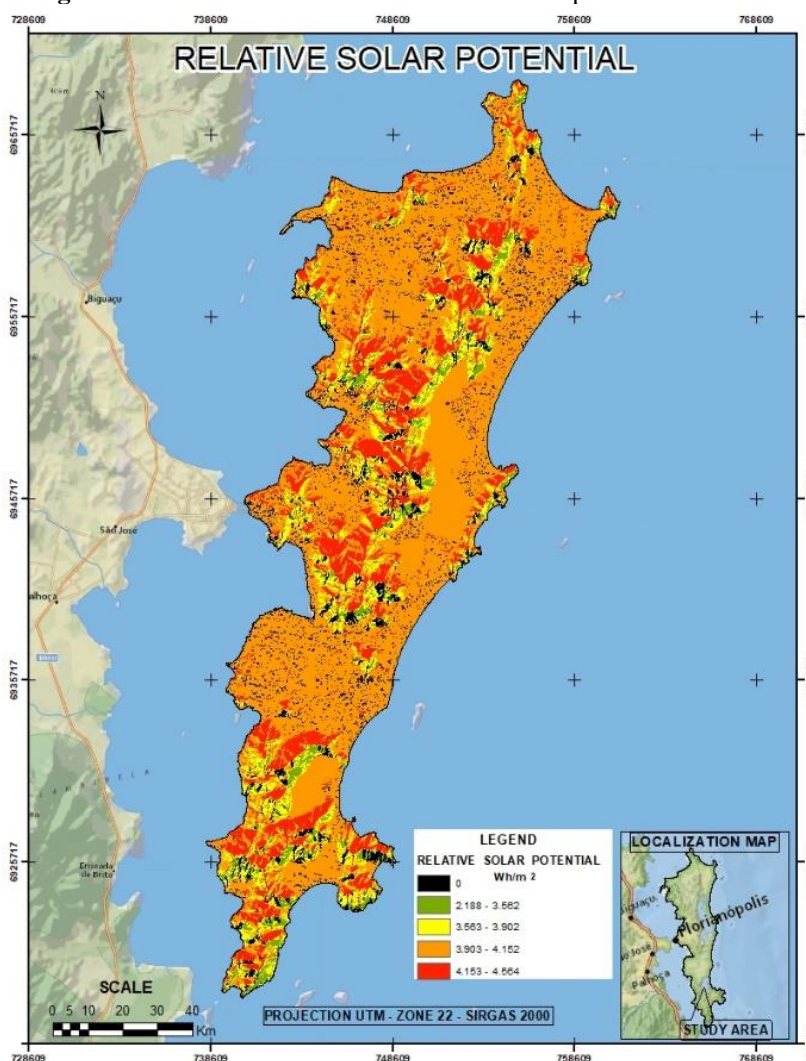


**Tabela 3** – Potencial solar absoluto - Média diária para o ano de 2019

Radiação (wh/m <sup>2</sup> )	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Entre 2,188 e 3,418	12,41	2,95
Entre 3,419 e 3,735	34,79	8,26
Entre 3,736 e 3,968	52,76	12,53
Entre 3,969 e 4,173	267,16	63,42
Entre 4,174 e 4,564	54,11	12,85
Total	421,23	100,00

Para melhor representação da realidade do potencial solar foi multiplicado, ao potencial solar absoluto, o potencial solar por aspecto, gerando o potencial solar relativo, que está sendo apresentado na Figura 7 e na Tabela 4, onde pode ser verificado que as áreas identificadas em preto não possuem potencial solar devido ao seu posicionamento (face sul). Isso corresponde a 7,89% da área pesquisada.

**Figura 7** – Potencial solar relativo – Média diária para o ano de 2019



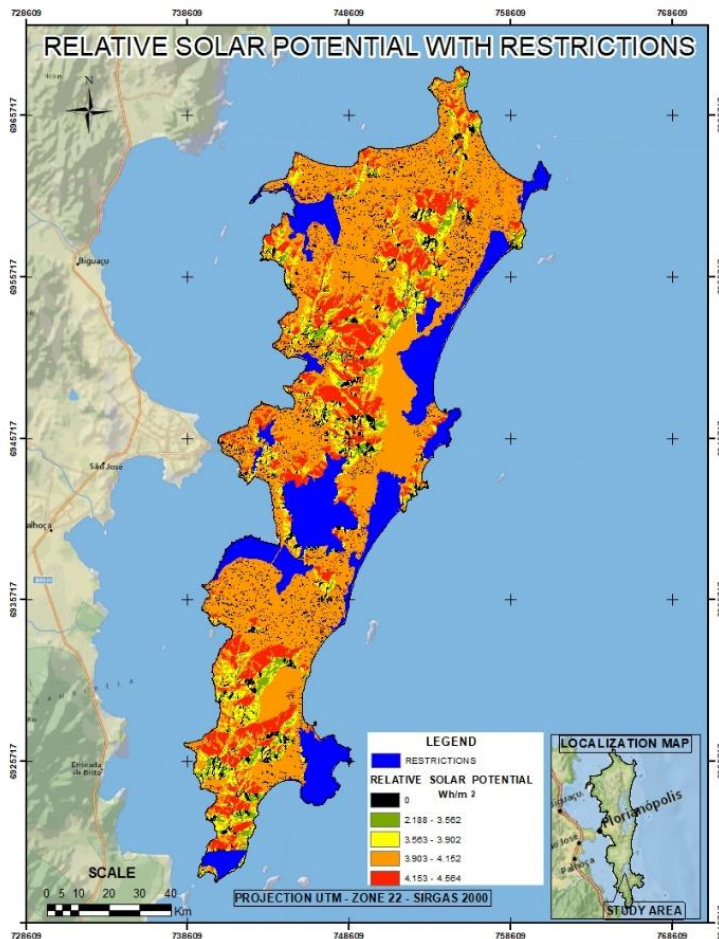
**Tabela 4** – Potencial solar relativo - Média diária para o ano de 2019

Radiação (wh/m <sup>2</sup> )	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
0	33,24	7,89
Entre 2,188 e 3,562	18,17	4,31
Entre 3,563 e 3,902	48,77	11,58
Entre 3,903 e 4,152	258,36	61,33
Entre 4,153 e 4,564	62,69	14,88
Total	421,23	100,00

Ainda na Figura 7 pode ser verificado que existem muitas áreas com potencial solar idêntico em 92,11% da área, com radiações calculadas entre 2,188 e 4,564 wh/m<sup>2</sup> (média diária para o ano de 2019).

De forma a identificar o potencial solar levando em consideração as restrições, ainda foi subtraído do mapa de potencial solar relativo, às Unidades de Conservação da Ilha de Florianópolis, resultando no mapa da Figura 8, onde pode ser verificado que aproximadamente 17% da Ilha é composta por essas Unidades de Conservação (apresentadas na cor azul) e nos valores por área de potencial solar relativo com restrições apresentados na Tabela 5.

**Figura 8** - Radiação solar global relativa com restrições – Média diária para o ano de 2019



**Tabela 5** – Potencial solar relativo com restrições - média diária para o ano de 2019

<b>Radiação (wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
Restrição (UC)	71,63	17,01
Sem potencial	26,36	6,26
Entre 2,188 e 3,562	16,37	3,89
Entre 3,563 e 3,902	40,92	9,71
Entre 3,903 e 4,152	212,70	50,50
Entre 4,153 e 4,564	53,25	12,64
Total	421,23	100,00

Ao observar a Figura 8 e a Tabela 5 pode ser verificado que, apesar de existir uma área de aproximadamente 17% de UC na Ilha, portanto sem expectativa de exploração de potencial solar, ainda restam 76,73% de área com potencial solar relativo a ser explorada, com valores de radiação entre 2,188 e 4,564 wh/m<sup>2</sup> (média diária para o ano de 2019), sendo que a maioria da área (63,14%) possui alto potencial solar com valores entre 3,903 e 4,564 wh/m<sup>2</sup>. Nenhuma outra restrição foi pesquisada porque considera-se que a energia solar pode ser explorada em áreas urbanas e, inclusive, em regiões de lagos/lagoas.

## 6. Conclusões e Considerações Finais

Conclui-se que todos os objetivos foram atingidos, uma vez que foram definidas as informações e produtos cartográficos necessários ao desenvolvimento do modelo e da aplicação; foi implementado um modelo em *ModelBuilder* que resultou na identificação de possíveis áreas com potencial solar e; o modelo em *Modelbuilder* foi aplicado em uma área de estudo para validação. Os consequentes mapas gerados apresentaram resultados satisfatórios, apontando o referido potencial solar para a área de estudo, ou seja, a Ilha de Florianópolis.

Considera-se que: a aplicação do *Modelbuilder* em diferentes regiões geográficas depende de alguns fatores e necessita que algumas premissas sejam contempladas, como a utilização de MDE para extração da altitude e aspecto (faces de sol), de imagens de satélite ou mapas de uso e ocupação do solo de forma rasterizada para definir as possíveis restrições.

Em relação ao potencial solar da região conclui-se que é alto para exploração solar, pois mais de 76% da região possui algum potencial solar, entre baixo e excelente, devido, principalmente ao relevo e à situação geográfica da Ilha, com muitas faces voltadas ao Norte, Nordeste e Noroeste.

Para as áreas com potencial solar identificadas neste trabalho recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados em relação ao tipo de equipamento a ser instalado (térmico para aquecimento de fluídos ou fotovoltaico para geração de energia elétrica), bem como a utilização de outros modelos com maiores resoluções, como os Modelos Digitais de Superfícies (MDS) advindos de levantamentos à laser ou de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), para validação e aprimoramento dos resultados.

Recomenda-se ainda que, para aplicações deste modelo geográfico em outras regiões do globo terrestre, as seguintes premissas sejam levadas em consideração *a priori*: existência de MDE e MDS, configuração de parâmetros para o hemisfério, latitude e aspecto do local, bem como verificação do número de horas de sol por ano, nebulosidade e chuvas.

## 7. Referências

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica. (2008). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. (3a ed.). Brasília: ANEEL.



- Arendt, H. (2000). **A condição humana**. (10a ed.). Rio de Janeiro: Forense Universitária.
- CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. (2001). **Atlas do Potencial Elétrico Brasileiro**. Brasília: CEPEL/ELETRONBRAS/Ministério de Minas e Energia.
- Chien, P. (2000). Endeavour maps the world in three dimensions. **Geoworld**, 37, 32–38.
- Colle, S.; Pereira, E. B. (1998). **Atlas de Irradiação Solar do Brasil – 1ª versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície**. Brasília: INPE.
- Debetir, E.; Orth, D. M. (2007). Estratégias de gestão para unidades de conservação. **Unidades de conservação: gestão e conflitos**. (Debetir, E.; Orth, D. M org.). Florianópolis: Insular Ltda.
- Eloy, A. (2009). **Energias Sem-fim – Contrariando as Alterações Climáticas**. Lisboa: Edições Colibri.
- Fu, P., Rich, P.M.. (1999). Design and implementation of the solar analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. **Proceedings of XIX Annual ESRI User Conference**, San Diego, Califórnia, United States.
- Hardt, M; Negri, A. (2004). **Multidão: Guerra e democracia na era do império**. Rio de Janeiro: Record.
- Hetrick, W. A.; Rich, P. M; Weiss, S. B. (1993). Modeling insolation on complex surfaces. **Thirteen Annual ESRI User Conference**, (2), 447–458.
- Hetrick, W.A.; Rich, P.M.; Barnes, F.J.; Weiss, S.B. (1993). GIS–based solar radiation flux models. **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers**, (3, GIS Photogrammetry and Modeling), 132–143.
- Jensen, J. R (2011). **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. (3a ed.). São José dos Campos: Parêntese.
- JPL - Jet Propulsion Laboratory. (2019). **Radar Science and Engineering**. California, United States. Disponível em: <https://communicationstrackingradar.jpl.nasa.gov/sections/sec-334/>. Acesso em: 02/06/2019.
- Julião, R. P.; Celestino, V. S. (2016). Modelação Geográfica e Energias Renováveis. Aplicações para apoio à decisão na identificação de fontes alternativas. **XV Coloquio Ibérico de Geografia**, Murcia, Espanha.
- Köppen, W. (1996). **Sistema geográfico dos climas**. Recife: Série B - Textos Didáticos.
- Lovins, A. B. (1997). **Soft energy paths: towards a durable peace**. Harmondsworth, United Kingdom: Penguin Books.
- Mendes, P. G. (2013). **Desenvolvimento de uma aplicação SIG no apoio à gestão da rega: o caso de estudo do Alentejo (Portugal)**. Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Monteiro, C. A. F. (1991). **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico**. Florianópolis: Editora da UFSC.

Moreira, M. A. (2003). **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. São José dos Campos: INPE.

ONU DI - Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial. (2013). **Observatório de Energias Renováveis para a América Latina e o Caribe – Energia e Mudança Climática**. Programa de Capacitação em Energias Renováveis.

Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Rütther, R. (2006). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE.

PV GIS - Photovoltaic Geographical Information System. (2019). **The European Commission's science and knowledge service**. Ispra, Italy. Disponível em: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>. Acesso em: 15/06/2019.

Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. (2003). The Shuttle Radar Topography Mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Journal Of Photogrammetry & Remote Sensing**, 57, 241–262.

Reginato, V. S. C.; Julião, R. P. (2019). Geographic Modelling of Wind and Solar Energy Potential. **Bulletin of Geodetic Sciences**, 25 (3), 1-25.

Rich, P. M. (1989). **A manual for analysis of hemispherical canopy photography**. Los Angeles: Los Alamos National Laboratory Report.

Rich, P. M. (1990). Characterizing plant canopies with hemispherical photography. **Remote Sensing Reviews**, 5 (1), 13–29.

Rich, P.M.; Hetrick, W.A.; Saving, S.C. (1995). **Modeling Topographic Influences on Solar Radiation: a manual for the Solarflux model**. Los Angeles: Los Alamos National Laboratory Report.

Santos, C. M.; Souza, J. L.; Teramoto, E. T.; Tiba, C.; Melo, R. O. (2014). Modelagem da irradiação solar global média horária mensal ( $h_g^h$ ) para quatro localidades de Alagoas/Brasil. **Nativa**, Sinop, 2 (2), 79-88.

Strahler, A. N. (1986). **Geografia Física**. Barcelona: Ediciones Omega.

Šúri, M.; Huld, T. A.; Dunlop, E. D. (2005). PVGIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. **International Journal of Sustainable Energy**, United Kingdom, 24 (2), 55-67.

Šúri, M.; Huld, T. A.; Dunlop, E. D.; Ossenbrink, H. A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. **Solar Energy**, Amsterdã, 81 (10), 1295-1305.

The Solar Analyst 1.0. (1999/2000). **User Manual**. Disponível em: [http://professorpaul.com/publications/fu\\_rich\\_2000\\_solaranalyst.pdf](http://professorpaul.com/publications/fu_rich_2000_solaranalyst.pdf). Acesso em: 15/07/2019.

Tiba, C. (2000). **Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestre**. Recife: Editora Universitária UFPE.