

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**DIEGO ANDRADE ALMEIDA**

**ZONEAMENTO PARA EXPLORAÇÃO DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA  
(CSP) E FOTOVOLTAICA (PV) NO CEARÁ ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO ENTRE  
SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

**Maracanaú - CE**

**2018**

DIEGO ANDRADE ALMEIDA

ZONEAMENTO PARA EXPLORAÇÃO DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA (CSP)  
E FOTOVOLTAICA (PV) NO CEARÁ ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO ENTRE SISTEMA  
DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Erika da Justa Teixeira Rocha

Maracanaú - CE

2018

DIEGO ANDRADE ALMEIDA

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO CEARÁ: ZONEAMENTO  
PARA EXPLORAÇÃO DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA (CSP) E  
FOTOVOLTAICA (PV) ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO ENTRE SISTEMA DE  
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E ANÁLISE MULTICRITÉRIO

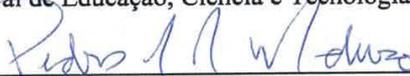
Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 14/03/2018.

BANCA EXAMINADORA



Profª. Dra. Erika da Justa Teixeira Rocha (Orientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Prof. Dr. Júlio César da Costa Silva  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário  
Gláucio Barreto de Lima - CRB-3/995

A447 Almeida, Diego Andrade.

Zoneamento para exploração de energia solar concentrada (CSP) e fotovoltaica (PV) no Ceará através da integração entre sistema de informações geográficas e análise multicritério / Diego Andrade Almeida -- 2018.

73 f.

Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) -  
- Instituto Federal de Educação Ciência e  
Tecnologia do Ceará, campus Maracanaú, 2018.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Érika da Justa  
Teixeira Rocha.

1.ENERGIA SOLAR. 2.USINA SOLAR. 3.ZONEAMENTO  
AMBIENTAL. I.Título.

621.47

Sistema AutoCata(Desenvolvido por Cledson Oliveira)  
SIBI/PROEN - Biblioteca Rachel de Queiroz - IFCE-Maracanaú

Aos meus pais, Rosângela e Auricélio,  
Á minha irmã Dayane,  
A todas as pessoas de bom coração.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua graça e amor em minha vida e por sua bondade e misericórdia com o mundo. A Ele cuja metodologia é pura, verdadeira, justa e amorosa. A Ele pelo sangue derramado na cruz.

A Vovó Auri (*In memorian*), por sua vida, carinho, ensinamentos e bom humor. Pela graça transformadora em sua vida, cujas raízes permeiam nossa árvore familiar. A quem espero encontrar logo.

Aos meus pais Rosângela e Auricélio pelo esforço e dedicação em me educar para a vida e pelos sacrifícios que atravessaram para que eu galgasse inúmeros degraus em minha jornada acadêmica e profissional.

A minha irmã Dayane, a quem amo muito. Cujo coração e bom humor me incentivam nessa jornada escura e cruel.

A todos os tios, tias, primas e primos que contribuíram em diversos aspectos da minha vida.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Erika da Justa pela orientação neste trabalho.

Ao Professor Pedro Medeiros, pelo apoio e solicitude na condução desta pesquisa. A quem levo como referência humana e profissional para a vida. Obrigado pelo estímulo e contribuições essenciais para que este trabalho pudesse ter sido levado adiante.

A professora e amiga Adriana Marques, por ouvir meus lamentos, compartilhar suas histórias e me inspirar a ser uma pessoa boa e viver da melhor forma possível. Uma alma com um dos corações mais bonitos que já vi.

Ao professor Geraldo Ramalho pelos conselhos e admoestações necessárias para levar esta pesquisa adiante. Por me mostrar como uma admoestação faz crescer mais que um elogio.

Ao professor Auzuir Ripardo pelas contribuições para com este trabalho.

A secretária do PPGER Rafaely Alcântara, pela solicitude e apoio para com as demandas administrativas e acadêmicas.

A todos os amigos e colegas, em especial: Tiago Cirineu, Camylla Rachelle e Lígia Aguiar. Muito obrigado por todo o suporte, contribuições e torcida.

A FUNCEME pela disponibilização dos materiais necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

A adequação para instalações de energia solar é pouco estudada no Ceará, uma vez que, embora existam algumas avaliações de recursos solares, há escassez de estudos sobre a aplicação desse potencial às condições espaciais e critérios de exclusão que impeçam sua instalação. O objetivo geral deste trabalho é identificar áreas adequadas para alocação e aproveitamento da energia solar (CSP e PV) no Estado do Ceará através da integração entre o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e tomada de decisões de análise multicritério. Na primeira etapa foram excluídos locais inadequados para exploração solar, segundo critérios como: áreas protegidas, uso e ocupação do solo, topografia, recursos hídricos e expansão urbana. Em seguida foram analisadas condições apropriadas para recursos solares, disponibilidade de água, proximidade com rodovias, proximidade com rede elétrica, proximidade com cidades e proximidade a centros econômicos de demanda. A técnica de análise hierárquica de processo foi aplicada para avaliar a influência de cada critério de classificação. Embora o Ceará tenha potencial para exploração CSP está é insustentável diante das características climatológicas encontradas. Foi identificada uma área adequada de 62.110 km<sup>2</sup> para exploração fotovoltaica, das quais foram designados 17.391 km<sup>2</sup> como mais adequado, 13.664 km<sup>2</sup> como adequados, 6.211 km<sup>2</sup> como moderadamente adequados e 24.844 km<sup>2</sup> foram designados como pouco adequados.

**Palavras – chave:** Energia solar. Zoneamento. Potencial para instalação de usinas solares.

## ABSTRACT

Suitability for solar power installations is little studied in Ceará, since, although there are some solar resources assessments, there is a shortage of studies on the application of this potential spatial conditions and exclusion criteria to prevent your installation. The general objective of this work is to identify appropriate areas for allocation and use of solar energy (CSP and PV) in the State of Ceará through the integration between the use of geographic information Systems (GIS) and decision making of multi-criteria analysis. In the first stage were deleted inappropriate locations for solar exploration, according to criteria such as protected areas, use and occupation of the soil, topography, water resources and urban sprawl. Then appropriate conditions were analyzed for solar resources, water availability, and proximity to highways, proximity to power, proximity to cities and proximity to economic centers of demand. The technique of hierarchical analysis process was applied to evaluate the influence of each sort criteria. Although the Ceará has potential for exploration is CSP is unsustainable on climatological characteristics found. It was identified a suitable area of 62,110 km<sup>2</sup> for photovoltaic farm, of which were designated as more appropriate 17,391 km<sup>2</sup>, as 13,664 6,211 km<sup>2</sup>, as moderately suitable 24,844 km<sup>2</sup> and have been designated as little.

**Keywords:** Solar energy. Zoning. Potential for installation of solar power plants.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidade instalada global de energias renováveis e não – renováveis no período de 2001 a 2015.....	Pág. 19
Figura 2 –Participação estimada de energias renováveis na produção mundial de eletricidade para o ano de 2015.....	Pág. 20
Figura 3 – Componentes da radiação solar.....	Pág. 21
Figura 4 – Comparação das médias mensais e anual da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10° N na cidade de Manaus – AM.....	Pág. 25
Figura 5 – Tecnologias CSP disponíveis atualmente: (a) Torre de energia solar; (b) coletor parabólico; (c) refletor linear fresnel; (d) sistema de prato parabólico...	Pág. 27
Figura 6 – Fluxograma de desenvolvimento de projetos proposto por Tiba et al (2010) utilizando SIG.....	Pág. 29
Figura 7 – Enquadramento geográfico do Estado do Ceará.....	Pág. 36
Figura 8 – Procedimento metodológico utilizado neste estudo, baseado em SIG, para exclusão de áreas inaptas.....	Pág. 39
Figura 9 – Procedimento metodológico utilizado neste estudo, baseado em SIG, para identificação de aptidão de áreas à instalação de sistemas de energia solar.....	Pág. 43
Figura 10 – Áreas de exclusão para mapeamento do potencial de energia solar no Ceará.....	Pág. 51
a. Áreas protegidas.....	Pág. 51
b. Uso e ocupação do solo.....	Pág. 51
c. Topografia (CSP).....	Pág. 51
d. Topografia (PV).....	Pág. 51
e. Recursos Hídricos.....	Pág. 52
f. Expansão Urbana.....	Pág. 52
Figura 11 – Máscara de exclusão para instalações do tipo CSP em grande escala no estado do Ceará.....	Pág. 53
Figura 12 – Máscara de exclusão para instalações do tipo PV em grande escala no estado do Ceará.....	Pág. 55
Figura 13 – Áreas adequadas para instalações do tipo PV em grande escala no estado do Ceará.....	Pág. 56
Figura 14 – Áreas adequadas à exploração fotovoltaica e centrais PV já instaladas no estado do Ceará.....	Pág. 58
Figura 15 – Classes de IDN anual no Ceará.....	Pág. 59

Figura 16 – Classes de IGH anual no Ceará.....	Pág. 60
Figura 17 – Critérios de classificação para identificação de aptidão de áreas à instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica no Ceará.....	Pág. 61
a. Rodovias.....	Pág. 61
b. Linhas de transmissão.....	Pág. 61
c. Subestações.....	Pág. 61
d. Centros econômicos de demanda.....	Pág. 61
e. Cidades com 100 a 250 mil habitantes.....	Pág. 62
f. Cidades com mais de 250 mil habitantes.....	Pág. 62
Figura 18 – Classificação de áreas adequadas à instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica no Ceará.....	Pág. 63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de critérios de classificação conforme método proposto por Aly et al. (2017).....	Pág. 48
Tabela 2 – Valores de critérios de decisão conforme método proposto por Aly et al. (2017).....	Pág. 49
Tabela 03 – Dez maiores disponibilidades de áreas adequadas para exploração PV no Ceará.....	Pág. 57

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADECE - Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará

AHP - *Analytic Hierarchy Process*

ANP - *Analytic Network Process*

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

APP – Área de Preservação Permanente

CC – Critérios de Classificação

CE – Critérios de Exclusão

CENSOLAR - *Centro de Estudios de la Energía Solar*

CIPP - Complexo Industrial e Portuário do Pecém

CPV – *Concentrated Photovoltaic*

CSP – *Concentrated Solar Power*

DER/CE - Departamento Estadual de Rodovias do Ceará

ESRI - *Environmental Systems Research Institute*

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

GEE – Gases de Efeito Estufa

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH - Irradiação Difusa Horizontal

IDN - Irradiação Direta Normal

IGH - Irradiação Global Horizontal

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais do Brasil

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará

IRENA - *International Renewable Energy Agency*

LFR - *Linear Fresnel Reflectors*

LABSOLAR/UFSC - Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina

MCDM - *Multiple-Criteria Decision-Making*

MDE – Modelo Digital de Elevação

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NREL - *National Renewable Energy Laboratory*

OLADE - Organização Latino Americana de Energia

PDC - *Parabolic Dish Collectors*

PTC – *Parabolic Trough Collector*

PV – *Photovoltaic*

PVGIS - *Photovoltaic Geographical Information System*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIGEL - Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico

SNUC - Sistema Nacional de Unidades de Conservação

SSE - *Surface Meteorology and Solar Energy*

STP – *Solar Power Towers*

SWERA - *Solar and Wind Energy Resource Assessment*

UC – Unidades de Conservação

UFV – Unidade Fotovoltaica

UNEP - *United Nations Environment Programme*

## LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA E ABREVIATURAS

°C – Graus Celsius

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

GW – Gigawatt

h – horas

H<sub>2</sub>O – Água

km – Quilômetro

km<sup>2</sup> - Quilômetro quadrado

kv - Quilovolt

kWp – Quilowatt pico

kWh/m<sup>2</sup> - Quilowatt hora por metro quadrado

kWh/m<sup>2</sup>.dia – Quilowatt hora por metro quadrado por dia

L/mWh – litros por megawatt hora

mm – milímetros

O<sub>2</sub> – Oxigênio

O<sub>3</sub> – Ozônio

S – Sul

W – Oeste

W/m<sup>2</sup> - Watt por metro quadrado

Wh/m<sup>2</sup> - Watt hora por metro quadrado

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	Pág. 14
2. OBJETIVOS.....	Pág. 16
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	Pág. 17
3.1 Energias Renováveis.....	Pág. 17
3.2 Energia Solar.....	Pág. 20
3.2.1 Radiação Solar.....	Pág. 21
3.2.2 Medição da radiação solar.....	Pág. 23
3.2.3 Avaliação da radiação solar.....	Pág. 23
3.3 Sistemas fotovoltaicos (PV).....	Pág. 25
3.4 Energia Solar Concentrada (CSP).....	Pág. 27
3.5 Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e energias renováveis	Pág. 28
3.6 Análise multicritério.....	Pág. 32
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	Pág. 36
4.1 Área de estudo.....	Pág. 36
4.2 Análise SIG.....	Pág. 38
4.3 Classificação de áreas adequadas.....	Pág. 42
4.4 Aplicação método <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP).....	Pág. 47
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	Pág. 50
6. CONCLUSÕES.....	Pág. 64
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	Pág. 66

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma matriz energética com uma grande participação de energias renováveis (43,5% para o ano de 2016) se comparado à de outros países. No entanto, no referido ano o país atingiu a marca de emissão de 428,95 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> equivalente)<sup>1</sup>, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017). Somente o aproveitamento hidroelétrico é responsável pela geração de mais de 65% da eletricidade do país (MMA, 2017).

Quando a oferta de energia hidroelétrica é prejudicada por fenômenos naturais como secas e diminuição de precipitações, outras fontes são acionadas, majoritariamente são usinas termelétricas, cuja produção é mais cara e mais poluente. Isso implica na elevação do preço ao consumidor uma vez que a partir de 2015 as contas de energia passaram a englobar o conceito de sistema de bandeiras tarifárias, o qual se paga mais à medida que os custos de geração de eletricidade se elevam. Isto é ainda severo quando se pensa sobre a vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro às mudanças climáticas, que tendem a intensificar eventos extremos como as secas (MMA, 2017).

Para Pereira et al. (2008), o Brasil possui uma grande disponibilidade de recursos energéticos e suas fontes renováveis podem contribuir para manter uma grande participação na produção e uso da energia, dando ao país vantagens consideráveis em termos econômicos e ambientais. Não obstante, o país ainda caminha lentamente para construção de uma matriz energética mais sustentável e racional dos seus recursos.

Santos (2015) reitera que fontes de energia renovável como a de biomassa, a solar e a eólica vêm sendo exploradas e desenvolvidas, embora o sistema elétrico brasileiro tenha se baseado, há décadas, na geração hidráulica auxiliada por fontes térmicas oriundas de combustíveis fósseis.

O Estado do Ceará, dado a sua localização geográfica estratégica (faixa litorânea extensa e elevada radiação solar) conta, em sua matriz energética, com plantas de geração de energia elétrica, em operação, por fonte eólica, térmica a diesel, a gás, a carvão mineral, e, ainda, com uma UFV – Central Geradora Solar Fotovoltaica. Destaca-se o papel das eólicas,

---

<sup>1</sup> CO<sub>2</sub> equivalente - Medida utilizada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa, baseada no potencial de aquecimento global de cada um, de acordo com a Decisão 17/COP-8. O dióxido de carbono equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de Gases de Efeito Estufa (GEE) pelo seu potencial de aquecimento global (MMA,2017).

que já representam 55,31% da matriz energética cearense, quando se compara a potência total projetada e instalada entre as fontes existentes (SANTOS, 2015).

Embora a tecnologia de uso solar para energia solar concentrada e fotovoltaica (CSP e PV) ainda não tenham despontado no país pelo seu elevado custo, em comparação à energia eólica e de biomassa, em regiões estratégicas ela se apresenta como modalidade de exploração e uso comercial, dado seu potencial. Sob a ótica local, o estado do Ceará se destaca no cenário nacional com uma média de radiação solar de 5,5 kWh/m<sup>2</sup>.dia (média brasileira é de 4,9 kWh/m<sup>2</sup>.dia), sendo o maior participante nas potências outorgadas de unidades geradoras fotovoltaicas de energia elétrica (PICANÇO; ROLIM, 2016; IBGE, 2016).

Dessa forma, o Ceará desponta no cenário nacional como agente potencial no aproveitamento energético de origem solar. Neste contexto o desenvolvimento de pesquisas no âmbito das energias renováveis vem a fortificar essa linha de pensamento que busca caminhos alternativos e mais sustentáveis para a oferta energética. Por sua vez, embora seja comum na literatura grandes vantagens destas fontes, faz-se necessário a discussão e avaliação da real sustentabilidade oferecida, pois mesmo que os recursos sejam ditos limpos, critérios de alocação e instalação podem majorar impactos ambientais locais.

É certo que qualquer meio de aproveitamento energético causa de forma direta ou indireta impactos ao meio ambiente e, portanto, critérios de sustentabilidade são apenas atenuadores, uma vez que “a alteração da paisagem natural é basicamente comum a todos eles” (PINHO et al., 2008).

Priorizar a viabilidade ambiental e econômica na instalação de usinas solares é uma boa ferramenta para desenvolver sua expansão segundo um planejamento estratégico ordenado.

Mapear áreas adequadas para exploração de fontes renováveis por sua vez envolve o uso de uma variedade de fontes de dados em que os pesos são atribuídos a critérios geográficos. Para isso, o uso de sistema de informação geográfica (SIG) associado a técnicas de análise de tomada de decisão multicritério se configura como excelente ferramenta para identificação de áreas com potencial real para exploração de energias renováveis. A adequação para instalações de energia solar é pouco estudada no Ceará, uma vez que, embora existam algumas avaliações de recursos solares, há escassez de estudos sobre a aplicação desse potencial às condições espaciais e critérios de exclusão que impeçam sua instalação. Desta forma, este trabalho aborda essa lacuna de pesquisa com a seguinte questão científica: "Onde são os locais mais adequados no Ceará para exploração de energia solar em média e grande escala?"

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é identificar áreas adequadas para alocação e aproveitamento da energia solar (CSP e PV) no Estado do Ceará através da integração entre o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e tomada de decisões de análise multicritério com vistas a contribuir com o planejamento e a gestão da infraestrutura energética no Ceará.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar critérios ambientais, econômicos e sociais na alocação para exploração de energia solar;
- Aplicar técnicas de análise multicritérios em combinação com o SIG para definir e mapear áreas mais favoráveis para instalação de usinas solares;
- Contribuir com a gestão de recursos energéticos no Estado do Ceará, produzindo informações de subsídio para planejamento de rede de infraestrutura de energia e estimulando o uso de energia renovável solar.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Energias Renováveis

As fontes de energias podem ser classificadas em não renováveis e renováveis. O primeiro grupo engloba fontes fósseis e nucleares (petróleo, carvão mineral, gás natural, xisto betuminoso, urânio, dentre outros) cuja “reposição requer um horizonte de tempo geológico” segundo Goldemberg e Lucon (2007). Pinho et al. (2008) afirmam que estas “não são produzidas à mesma taxa em que são consumidas e, por essa razão, se continuarem a ser utilizados nas taxas atuais, terão seus estoques esgotados”. O segundo grupo abrange fontes repostas imediatamente pela natureza, tais como potenciais hidráulicos, eólicos, energia das marés e das ondas, radiação solar, calor do fundo da terra (geotermal) e biomassa (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Para Panwar, Kaushik e Kothari (2011) os recursos energéticos podem ainda ser divididos em três categorias: combustíveis fósseis, energias renováveis e energia nuclear.

Energias renováveis, portanto, são aquelas cujas fontes produtoras agem na natureza de forma a serem repostas ciclicamente no ambiente, não havendo esgotamento ante a sua utilização pelo homem (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Panwar, Kaushik e Kothari (2011) afirmam que tais energias são “primárias, domésticas e limpas ou inesgotáveis”. Pinho et al. (2008) alertam que “deve-se ter em mente que fontes, como por exemplo a biomassa natural, só pode ser considerada renovável se houver o seu correto manejo. Caso contrário, elas serão não renováveis.” Dincer (2000) destaca que a maioria destas modalidades de energia é resultante da radiação solar, assim, o Sol seria a grande fonte de matéria-prima para o aproveitamento direto e indireto através da conversão da luz solar em energia elétrica utilizável.

Para Selin (2017) as energias renováveis são consideradas alternativas ao uso tradicional de combustíveis fósseis, os quais são oriundos de recursos finitos e impactam negativamente o meio ambiente e a saúde humana através da emissão de poluentes atmosféricos, como dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio, matéria particulada, dentre outros. O início do desenvolvimento de pesquisas para utilização e comercialização de energia através de fontes renováveis data da década de 1970, proporcionado, segundo Dincer (2000), pela crise mundial do petróleo. Ressalta-se que a elevação da demanda de consumo destes combustíveis tem provocado desequilíbrios macroeconômicos, com elevação do preço do

petróleo no mercado prejudicando países cuja balança comercial é movimentada pela importação desta matéria prima (PEREIRA et al., 2012).

Bermann (2008) aponta o uso de energias renováveis como alternativa para reduzir os efeitos da crise ambiental global apontada pelas mudanças climáticas decorrentes das emissões de gases de efeito estufa. Benefícios como minimização de emissão de poluentes do ar, ofertas de emprego e desenvolvimento sustentável de zonas periféricas são citados por Panwar, Kaushik e Kothari (2011).

Como perspectiva para energia sustentável no século XXI, Howells e Roehrl (2012) expõem que o setor de energia deve se preocupar em permitir o acesso a “serviços adequados e acessíveis; assegurar que o sistema energético possa fazê-lo de maneira sustentável e assegurar que as interações mais amplas entre os sistemas não comprometam o desenvolvimento sustentável do planeta”.

Pereira et al. (2012) reiteram esta mudança na matriz energética mundial como estratégia para o desenvolvimento sustentável e garantia das atividades humanas dada a escassez de combustíveis fósseis. Flexibilidade e baixos custos operacionais são vantagens citadas por Dincer (2000) em detrimento dos grandes investimentos de capital, prazos de implementação e incerteza de custos operacionais requeridas pelas fontes tradicionais de energia. Expõe ainda que as “energias renováveis podem proporcionar pequenas adições de capacidade incremental aos sistemas de energia existentes com prazos de entrega curtos” (DINCER, 2000).

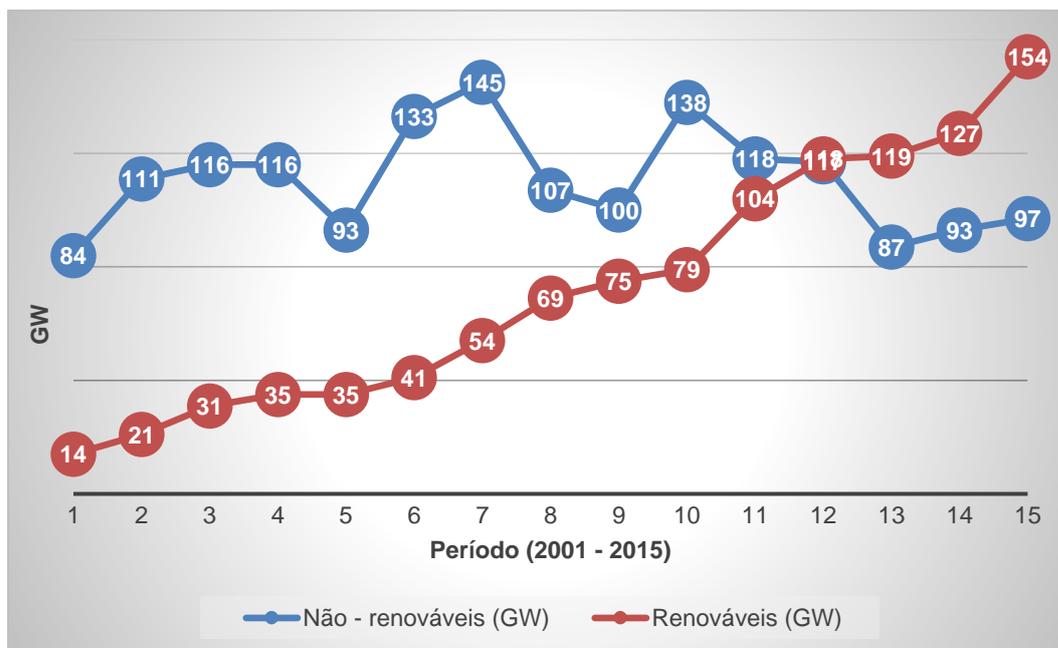
Em adição, ressalta a vantagem de se utilizar estes recursos como integração social através da geração distribuída, principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde parte da população, principalmente em áreas afastadas dos centros urbanos ainda carece de acesso a eletricidade.

Sob a ótica mercadológica, Dincer (2000) pontua a existência de um grande potencial técnico e comercial para o aumento da contribuição das fontes de energias renováveis nas demandas globais de energia. Tal fator beneficia a geração de empregos e resulta em investimentos no setor de pesquisa e desenvolvimento, proporcionando o apoio de instituições e agências governamentais de energia aos esforços das indústrias para exploração do potencial comercial no segmento de energias renováveis. Estudos recentes da *International Renewable Energy Agency* (IRENA,2017) e dos seus parceiros mostraram claramente que as energias renováveis são competitivas, atraentes para os investidores e criam milhões de novos postos de trabalho.

Segundo Pereira Junior et al. (2013), as tecnologias de fontes renováveis são o meio para desenvolver a sustentabilidade na produção de energia, no entanto acabam por esbarrar em obstáculos econômicos e tecnológicos. O fato de serem difusas e pouco acessíveis, bem como terem diferentes variabilidades regionais, são citados por Dincer (2000) como razões para dificuldades de natureza técnica, institucional e econômica na sua expansão de uso.

Em um cenário global, IRENA (2017) aponta que “mais de 170 países estabeleceram metas de energia renovável e cerca de 150 promulgaram políticas para catalisar investimentos em tecnologias de energia renovável.” Há uma mudança de paradigma nas últimas década e desde 2012 as instalações de capacidade de energia renovável ultrapassaram as não renováveis por uma margem crescente (Figura 1).

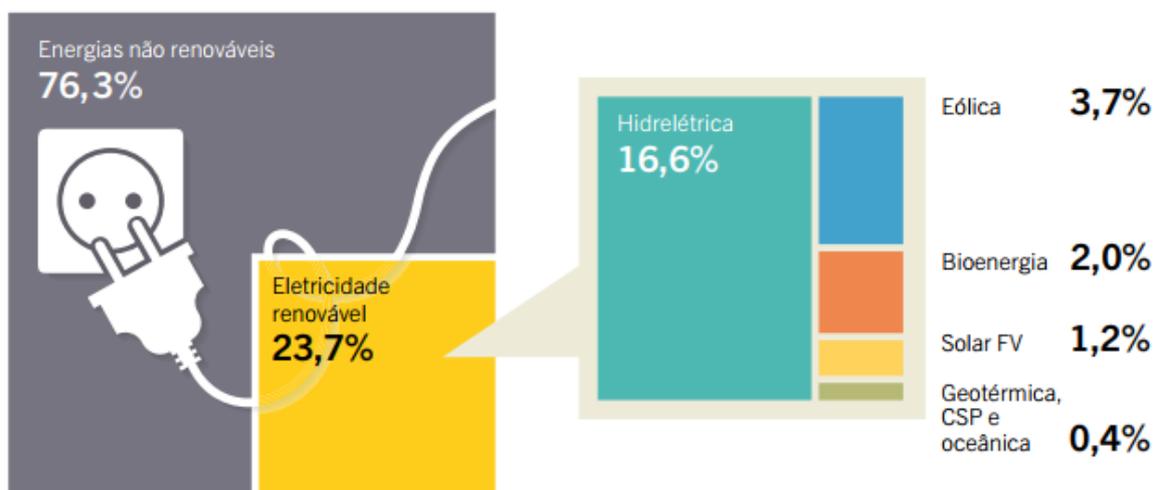
**Figura 1 – Capacidade instalada global de energias renováveis e não – renováveis no período de 2001 a 2015.**



Fonte: IRENA (2016b, adaptado)

Em 2015, energias renováveis corresponderam a 23,5 % de toda a eletricidade gerada no mundo. Destes, a energia hidroelétrica representou a maior quota de geração renovável, seguida pela energia eólica, bioenergia e solar fotovoltaica (Figura 2). Segundo IRENA (2017) “nos últimos anos, o crescimento da geração de energia superou em muito os aumentos na demanda global de eletricidade e na geração de não-renováveis.” No entanto, não obstante o crescimento das energias renováveis, o mundo continua fortemente dependente de tecnologias convencionais de energia.

**Figura 2 –Participação estimada de energias renováveis na produção mundial de eletricidade para o ano de 2015**



Fonte: REN21 (2016)

No que se refere ao apoio governamental para expansão do setor, “políticas têm ajudado a desencadear uma expansão global na implantação de energia renovável, permitindo que os custos venham a diminuir rapidamente, especialmente para energia solar fotovoltaica e energia eólica” (IRENA, 2017).

### 3.2. Energia solar

Somente a partir da segunda metade do século XXI iniciou-se o uso do Sol como fonte direta para a produção de eletricidade (TOLMASQUIM, 2016). Existem pelo menos duas tecnologias de geração de origem solar: “fotovoltaica, que consiste na conversão direta da luz em eletricidade; e a heliotérmica, que é uma forma de geração termelétrica, na qual um fluido é aquecido a partir da energia solar para produzir vapor (TOLMASQUIM, 2016).”

Pinho et al. (2008) ressaltam que dentre as tipologias de energias renováveis, a que apresenta menores escalas de impactos ambientais é a energia solar e que de forma indireta os impactos considerados, como os ocasionados no processo de fabricação de células fotovoltaicas, são praticamente desprezíveis.

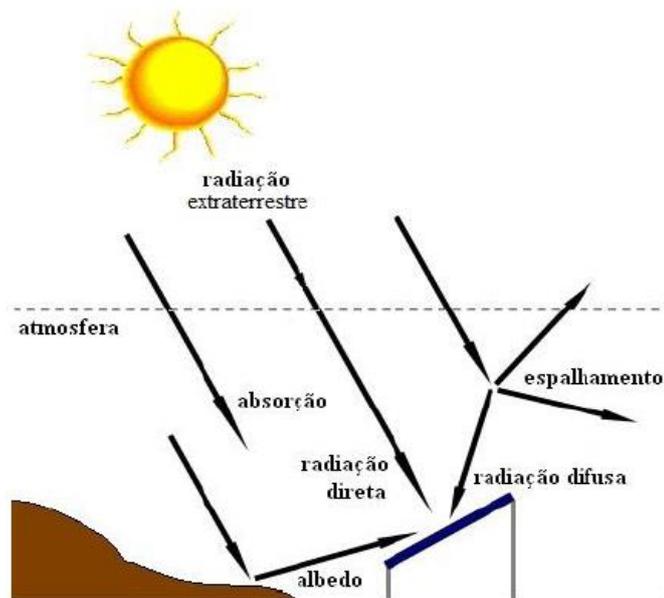
### 3.2.1 Radiação solar

A radiação solar é conceitualmente a energia oriunda do Sol, a qual ao atingir a superfície terrestre pode ser decomposta em planos (Figura 3). De acordo com Lebeña & Costa (1996) e Tolmasquim (2016) temos que:

No plano horizontal, a radiação global consiste na soma das componentes direta e difusa, enquanto que num plano inclinado, além das duas componentes citadas, é acrescida de uma parcela refletida na superfície e nos elementos do entorno. As quais são:

- i) Radiação direta – a radiação proveniente diretamente do sol;
- ii) Radiação difusa – a radiação proveniente de todo o céu, exceto do disco solar. A radiação solar ao atravessar atmosfera, parte dela é refletida pelos componentes atmosféricos (nuvens), outra parte é absorvida por gases como Ozônio ( $O_3$ ), Oxigênio ( $O_2$ ), vapor de água ( $H_2O$ ) entre outros, e a restante é difundida;
- iii) Radiação refletida – radiação proveniente da reflexão do sol em contato com a superfície (chão), e com objetos circundantes. A refletividade do chão é designada por albedo e depende da composição e cor da superfície.

Figura 3 – Componentes da radiação solar



Fonte: Pinho et al. (2008)

A norma ABNT NBR 10899 define ainda dois termos principais usuais:

- i) Irradiação solar: irradiância solar integrada durante um dia, medida em watt hora por metro quadrado ( $Wh/m^2$ );
- ii) Irradiância solar: taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, medida em watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ) (ABNT, 2013).

Para o aproveitamento fotovoltaico, as irradiações de maior interesse segundo Tolmasquim (2016) são:

- i) Irradiação Global Horizontal (IGH), que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal, composta pela
- ii) Irradiação Difusa Horizontal (IDH) – parcela dispersa e atenuada por reflexões em nuvens, poeira, vapor d'água e outros elementos em suspensão na atmosfera - e pela
- iii) Irradiação Direta Normal (IDN) – parcela que atinge o solo diretamente, sem reflexões.

Em dias nublados, a principal parcela é a IDH, enquanto que em dias claros prevalece a IDN. Para a geração heliotérmica (CSP), assim como aplicações fotovoltaicas com concentração (CPV), a IDN é a parcela de maior importância.

Segundo Tolmasquim (2016), a radiação solar sofre variabilidades temporais e espaciais, devido a geografia terrestre, aos movimentos astronômicos de rotação e translação e a fenômenos climáticos, como a formação de nuvens. A irradiação, no entanto, varia de acordo com a posição terrestre e o conseqüente o ângulo de incidência dos raios solares.

Lohmann et al. (2006) afirma que:

Dentre as componentes, a Irradiação Direta Normal é a que mais varia ao longo do dia, principalmente em locais com altos índices de nebulosidade. Estudos mostram que no longo prazo, a irradiação direta é significativamente mais variável que a irradiação global, apresentando ciclos principais de 11 anos e outros de períodos mais longos. Se, por um lado, 2 a 3 anos de medição local permitem estimar a média de longo prazo para a irradiação global com margem de erro de 5%, para a irradiação direta podem ser necessários até mais do que 10 anos de medições para se alcançar essa mesma margem.

Por conseguinte, ressalta-se a importância da confiabilidade dos dados para a correta estimativa da energia a ser produzida por plantas solares, e sua conseqüente viabilidade (LOHMANN et al., 2006).

A irradiação global em uma superfície horizontal é forma mais frequente para se encontrar dados de radiação solar quando estes são disponíveis (PINHO et al., 2008). Pinho e Galdino (2014) demonstram que este dado em adição da inclinação igual a latitude local permite mensurar a energia elétrica que pode ser convertida por um sistema fotovoltaico. Pinho et al. (2008) informam ainda que “os dados do local são usados para determinar a contribuição individual direta e difusa para a irradiação global total no plano horizontal.”

### 3.2.2 Medição da radiação solar

Projetos que visam a absorção e conversão da energia solar necessitam que se tenham medições da radiação solar, seja de forma global ou de suas componentes direta e difusa. A consolidação destas medidas ao longo do tempo é essencial para avaliações sobre a instalação de sistemas fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014).

Para Pinho e Galdino (2014) a obtenção de dados de mediação da radiação solar é necessária para:

- i) Identificar e selecionar áreas mais propícias para instalação de sistemas fotovoltaicos;
- ii) Dimensionar o gerador fotovoltaico;
- iii) Calcular a produção de energia anual, mensal ou diária;
- iv) Dimensionar o sistema de armazenamento (para sistemas isolados);
- v) Estabelecer estratégias operacionais.

A obtenção de dados solares primários objetiva obter valores instantâneos do fluxo energético solar (irradiância) ou integrado (irradiação) em determinado intervalo de tempo (PINHO; GALDINO, 2014).

Conforme Pinho e Galdino (2014)

Existem dois instrumentos comumente utilizados para a mensuração da irradiação solar: o piranômetro e o pireliômetro, o primeiro para medidas de irradiação global e o segundo para medidas de irradiação direta. O piranômetro, seja do tipo termoeletrico ou fotovoltaico, mede a irradiação solar global (direta + difusa). Por sua vez, o pireliômetro mede a irradiância direta com incidência normal a superfície.

### 3.2.3 Avaliação da radiação solar

Pinho et al. (2008) descrevem três maneiras para se obter o levantamento do potencial de energia solar para fins de estudos de distribuição geográfica da radiação global: instrumentos de medição, modelos e mapeamento por satélite. Pinho e Galdino (2014) citam ainda a possibilidade de se obtê-lo de maneira indireta, através de correlações com outras variáveis meteorológicas, como número de horas de insolação e nebulosidade.

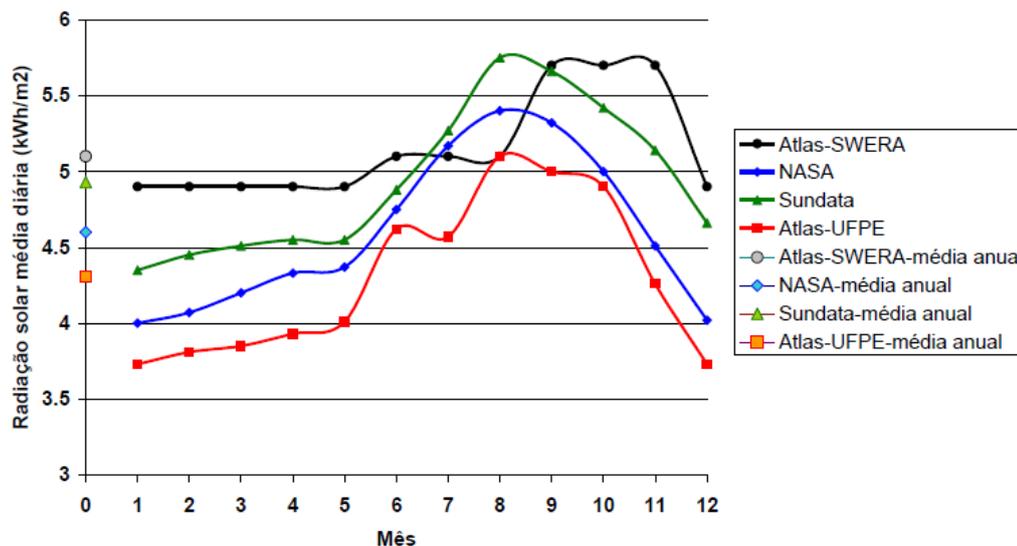
Pinho e Galdino (2014) tecem uma descrição histórica do levantamento de estudos realizados no Brasil para obtenção de informações a partir de medições de superfície, os quais resumidamente são:

- 1979 – Primeiro estudo publicado no Brasil (Nunes et al.) com mapas de irradiação solar obtidos através de correções com os dados de números de horas de insolação;
- 1987 - Publicação de novos mapas pela Organização Latino Americana de Energia (OLADE);
- 1989 - Universidade de Massachusetts digitaliza dados da OLADE e incorpora à base de dados da CENSOLAR, organização espanhola, disponibilizando-os no programa SunData;
- 1991 - Publicação das Normais Climatológicas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período de 1961 – 1990;
- 2000 - Publicação do Atlas Solarimétrico do Brasil.

Os referidos autores também mencionam a utilização de programas computacionais e que utilizam técnicas para estimar a radiação solar a partir de imagens de satélite, tais como o programa SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) das Nações Unidas que fornece mapas e dados compilados da radiação solar no Brasil; o banco de dados SSE (Surface Meteorology and Solar Energy) da National Aeronautics and Space Administration (NASA) que permite acessar valores médios da irradiação solar em qualquer localidade do mundo em uma resolução de 1° x 1° de latitude e longitude para um período de coleta de dados de 22 anos; o programa SunData que contém valores de irradiação diária média mensal no plano horizontal e inclinado e o programa RADIASOL 2, que permite exportar dados mensais ou horários de radiação solar e suas componentes direta e difusa e dados de temperatura ambiente (PINHO; GALDINO, 2014).

Face à exposição acima, um questionamento coerente seria quanto à escolha da melhor base de dados para o dimensionamento de projetos fotovoltaicos, Pinho e Galdino (2014) comparam os resultados dessas diferentes bases para a cidade de Manaus e destacam a liberdade de uso quanto ao objetivo de projeto (Figura 4): para o dimensionamento de sistema considerando um valor único de irradiação solar e se opte por uma atitude conservadora o valor adotado deveria ser o do pior mês. No entanto, caso se necessite de uma sequência de valores mensais a atitude mais conservadora seria compor uma base utilizando os piores valores para cada mês.

**Figura 4 – Comparação das médias mensais e anual da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10° N na cidade de Manaus – AM.**



Fonte: Soares et al. (2010) apud Pinho e Galdino (2014).

### 3.3 Sistemas Fotovoltaicos (PV)

Sistemas solares fotovoltaicos, também chamados de células solares ou PV (photovoltaic), são dispositivos eletrônicos que convertem a luz solar diretamente em eletricidade (IRENA, 2012). A célula fotovoltaica é unidade fundamental desse processo de conversão e se trata de um dispositivo fabricado com material semicondutor (PINHO; GALDINO, 2014). O silício é o material mais empregado, embora os elementos semicondutores pertençam principalmente aos grupos 14 a 16 da tabela periódica, incluindo carbono, silício, germânio, arsênio, fósforo, selênio e telúrio (PINHO; GALDINO, 2014).

Segundo Parida, Iniyan e Goic (2011) um sistema de geração de energia fotovoltaica consiste:

em múltiplos componentes, como células, conexões mecânicas e elétricas e montagens e meios para regular e / ou modificar a saída elétrica. Esses sistemas são classificados no pico de quilowatts (kWp), que é uma quantidade de energia elétrica que um sistema deve fornecer quando o sol está diretamente sobrecarga em um dia claro.

Pinho e Galdino (2014) afirmam que o sistema solar fotovoltaico

compreende o agrupamento de módulos em painéis fotovoltaicos e de outros equipamentos relativamente convencionais, que transformam ou armazenam a energia elétrica para que esta possa ser utilizada facilmente nas várias aplicações finais. É normalmente composto por três partes básicas: o arranjo dos módulos, o subsistema de condicionamento de potência, o qual converte a saída do arranjo em potência útil, e as baterias, que têm a função de armazenar a energia elétrica gerada

Os dispositivos fotovoltaicos são robustos e simples em design, exigem pouca manutenção e sua maior vantagem é a construção deles como sistemas autônomos para fornecer saídas de micro a megawatts. Apresentam diversas aplicações, entre as quais fonte de energia, bombeamento de água, sistemas domésticos solares, comunicações, satélites e veículos espaciais, plantas de osmose reversa e até mesmo plantas em larga escala para geração de eletricidade (PARIDA, INIYAN e GOIC, 2011). Em comparação com a energia solar concentrada, a fotovoltaica representa 98% da capacidade global instalada no ano de 2014 (REN21, 2015). Seu período histórico é compreendido em quatro etapas, conforme Tolmasquim (2016):

- i) Utilização em aplicações espaciais;
- ii) Início da década de 1970, se tornou atrativa por conta da crise do petróleo, usada em conjunto com baterias (sistemas *off-grid*);
- iii) Estímulo à geração fotovoltaica conectada à rede no final da década de 1990 (*on-grid*);
- iv) Competitividade com fontes convencionais de energia na geração centralizada no cenário atual.

A orientação de painéis fotovoltaicos segundo a inclinação é útil para otimização do aproveitamento solar. Assim, “o ângulo que usualmente é considerado como ótimo é igual à latitude do local, orientado ao norte, no hemisfério sul, de forma que a superfície receptora esteja perpendicular aos raios solares na média anual” (TOLMASQUIM, 2016). Vries, Van Vuuren e Hoogwijk (2007) definem que a potência técnica para um sistema PV é dada por:

$$E_i = G_i \times \eta_m \times \rho_r \quad (1)$$

Onde,  $\eta_m$  é a eficiência de conversão para módulos fotovoltaicos que depende do tipo de células PV e da temperatura do módulo,  $\rho_r$  é a relação de desempenho do sistema fotovoltaico, que é definida como a relação entre o desempenho de campo do sistema e seu desempenho na condição de teste padrão para insolação global de 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura do módulo de 25 °C e 1,5 massa de ar.  $G_i$  reflete um potencial geográfico dado pela fórmula:

$$G_i = A_i \times h^{-1} \times I \quad (2)$$

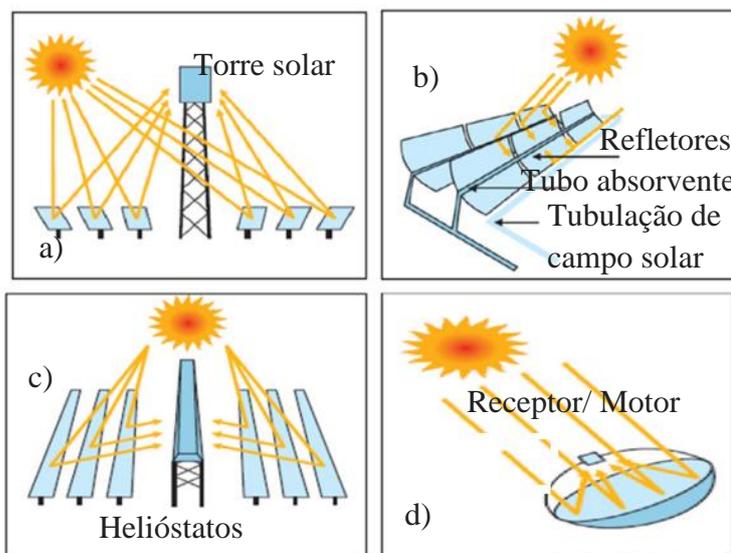
Onde,  $I$  é a insolação em kWh/m<sup>2</sup>/dia,  $A_i$  são as áreas adequadas para instalação PV e  $h$  é o número de horas de sol em um dia.

### 3.4 Energia Solar Concentrada (CSP)

Energia solar concentrada ou *concentrated solar power* (CSP) é uma tecnologia de geração de eletricidade que usa o calor fornecido pela irradiação solar concentrada em uma área pequena (IRENA, 2013). São unidades que usam espelhos para concentrar a luz solar em um receptor, que coleta e transfere a energia solar para um fluido de transferência de calor (ZHANG et al., 2013).

Irena (2013) afirma que as plantas CSP requerem uma intensa irradiação solar direta para o trabalho e, portanto, são uma opção muito interessante para a instalação em regiões bem insolaradas. Destaca ainda a importância do uso tecnologias CSP em regiões áridas como opção de fornecimento de calor para dessalinização de água. Zhang et al. (2013) corrobora ao sugerir que a tecnologia CSP pode ser uma fonte competitiva de energia em massa nas regiões mais ensolaradas até 2020. Irena (2013) ressalta que diferentemente da tecnologia PV o CSP usa apenas o componente direto (IDN) da luz solar e fornece calor e energia somente em regiões com IDN elevado. Segundo Zhang et al. (2013) existem atualmente quatro tecnologias CSP disponíveis (Figura 5) : coletor parabólico (PTC), torre de energia solar (STP), refletor linear Fresnel (LFR) e sistemas de prato parabólico (PDC).

**Figura 5 – Tecnologias CSP disponíveis atualmente: (a) Torre de energia solar; (b) coletor parabólico; (c) refletor linear fresnel; (d) sistema de prato parabólico.**



Fonte: Zhang et al. (2013)

Trieb et al. (2009) definem que a potência técnica para um sistema CSP é dada por:

$$E_i = G_i \times \text{Eficiência de uso da terra} \quad (3)$$

Onde,  $G_i$  é o potencial geográfico, o mesmo descrito para sistemas PV (equação 2), porém em vez de radiação global, a radiação normal direta é considerada para as tecnologias CSP. A eficiência do uso da terra é o produto do fator de uso da terra e da eficiência da conversão solar para elétrica. O fator de uso da terra é proporção da área coberta pelo sistema coletor CSP em relação à superfície terrestre total requerida.

### 3.5 Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e energias renováveis

Uma boa definição de SIG é apresentada por Jahangiri et al. (2016) o qual descrevem:

Sistema de informação geográfica (SIG) é um sistema de computador projetado para gerenciar e analisar informações espaciais e é capaz de capturar, armazenar, analisar e apresentar informações geográficas (espaciais). Através da recolha e integração de informações de bancos de dados e visualização e utilização das análises geográficas comuns, SIG fornece as informações necessárias para a preparação de mapas. Esta informação é usada para exibir eventos mais claramente, prever eventos e seus resultados e preparar mapas.

A habilidade de analisar mapa de sobreposições é umas das principais funções de um SIG, onde várias camadas de informações podem ser sobrepostas para revelar a localização ideal, através da aplicação de operadores lógicos e matemáticos (JAHANGIRI et al., 2016).

Jahangiri et al. (2016) descreve quatro fases distintas no desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas. O surgimento na década de 1960, possuindo como entrave a falta de tecnologia comercial para computadores, os anos 70 com o desenvolvimento de questões de geometria computacional, crescimento massificado ocasionado pelos avanços da microinformática e do fomento a pesquisas na década de 1980 e a última fase que prevalece até os dias atuais, onde os SIG's são marcados pelo seu caráter comercial e por sua aplicação multissetorial, como eletrificação, planejamento urbano e territorial, análises ambientais até cuidados com a saúde (JUCÁ; CARVALHO; JÚNIOR, 2006).

Para Jucá, Carvalho e Júnior (2006) as principais características dos SIG's são:

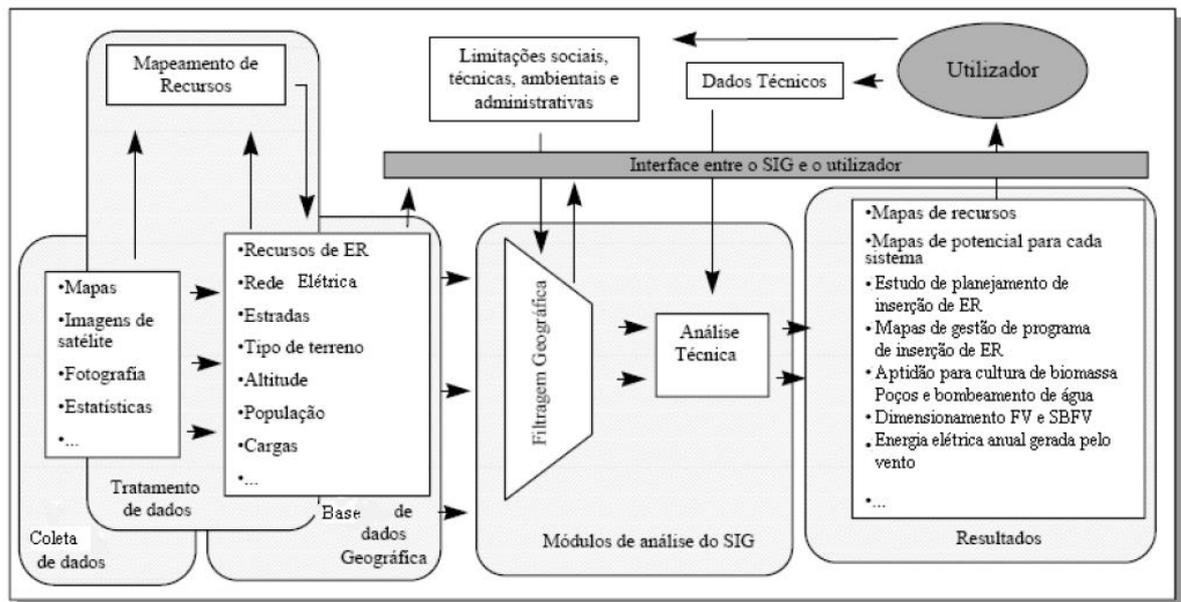
- Inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno;
- Oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados georeferenciados.

Uma das primeiras aplicações de geoprocessamento ao desenvolvimento setorial energético foi na elaboração de projetos de eletrificação rural, buscando a localização e identificação de domicílios a serem eletrificados bem como na definição de soluções viáveis e seu respectivo monitoramento (JUCÁ; CARVALHO; JÚNIOR, 2006).

As aplicações de SIG no campo das energias podem ser classificadas em três grupos: “suporte de decisão para a integração das energias renováveis em grande escala e a nível regional, avaliação de geração de energia distribuída e sua conexão à rede elétrica e para sistemas de produção de eletricidade descentralizado e autônomo” (Tiba et al., 2010).

Tiba et al. (2010) usaram SIG como ferramenta que permite a integração e o processamento de informações de diversas fontes para usá-lo na elaboração de estratégias de implantação e gerenciamento de eletrificação rural com energias renováveis (Figura 6).

**Figura 6 – Fluxograma de desenvolvimento de projetos proposto por Tiba et al (2010) utilizando SIG.**



Fonte: Tiba et al. (2010).

Tiba et al. (2010) também ressaltam que os recursos renováveis são fortemente influenciados por variabilidades espaciais: O recurso solar pela altitude, latitude e condições

fitogeográfico; o recurso eólico pela rugosidades e topografia da terra e a biomassa pelas características do solo e pluviometria. Dessa forma afirma que:

O SIG é uma ferramenta valiosa para avaliação e desenvolvimento da utilização dos recursos energéticos renováveis em grandes regiões, porque é uma ferramenta que é especialmente adequada para analisar as variabilidades espaciais do recurso, bem como também para resolver problemas de gestão e planejamento de programas de instalação de sistemas descentralizados, que são caracterizados por uma grande dispersão espacial.

Entretanto, outros critérios como uso e ocupação do solo, restrições ambientais, distância a linhas de transmissão e centros de demanda também são requeridos para a gestão e planejamento de sistemas de energias renováveis. Todas essas inter-relações, no entanto, podem ser coletadas, rapidamente quantificadas e visualizadas espacialmente em um SIG (Tiba et al., 2010).

Yue e Wang (2006) avaliaram as potencialidades locais em Taiwan de fontes de energia renováveis (eólicas, solar e biomassa) com a ajuda de um sistema de informação geográfica de acordo com as condições locais reais e também consideraram potencialidades e restrições locais, tais como condições climáticas, uso da terra e ambientes ecológicos.

Byrne et al. (2007) implementaram uma avaliação baseada em SIG para determinar as fontes de energia renovável na China através da avaliação de disponibilidade de recursos solares e eólicos bem como da viabilidade econômica de tais opções de energia renováveis.

Angelis-dimakis et al. (2011) apresentam em seu artigo, uma pesquisa sobre métodos e ferramentas atualmente disponíveis para determinar a energia potencial e explorável nos mais importantes setores renováveis (energia solar, eólica ondas, biomassa e energia geotérmica). Além disso, destacam desafios para cada recurso renovável bem como as ferramentas disponíveis que podem ajudar a avaliar o uso de uma mistura de diferentes fontes.

Dados de irradiação solar são de grande valia para o sucesso de planejamento e operação de sistemas de energia solar. A disponibilidade de energia solar na superfície da terra que pode ser convertida em calor ou eletricidade é um dos principais fatores que influenciam um desempenho economicamente viável de sistemas de energia solar, além dos custos de instalação, custos de operação e vida útil dos componentes do sistema (Angelis-dimakis et al, 2011).

Mahtta, Joshi e Jindal (2014) utilizaram dados de irradiação solar extraídos da NASA, dados do uso do solo e modelo digital de elevação (MDE) ambiente SIG e empregaram critérios de utilização dos solos e topografia para excluir locais impróprios para aproveitamento

da energia solar. Além disso, fator de cobertura de terra, o número de horas de sol e eficiências de conversão foram tidos em conta para calcular o potencial técnico nas áreas de terra adequada para o desenvolvimento de energia solar. O resultado mostra locais potenciais para a instalação de unidades fotovoltaicas e heliotérmicas em grande escala de plantas na Índia.

Sistemas de informações geográficas e sensoriamento remoto são apresentados como ferramentas baratas, eficientes e práticas para avaliar o potencial de várias alternativas de energia renovável, incluindo aspectos tais como, localização geográfica, a tecnologia utilizada para aproveitamento de energias renováveis, viabilidade econômica e outros (Mahtta, Joshi e Jindal, 2014).

Jahangiri et al. (2016) investigam os melhores locais para a aplicação de sistemas de vento-solar híbrido no Médio-Oriente com base em critérios locais e econômicos usando software de SIG.

Wong et al. (2016) desenvolveram um trabalho para estimar o potencial de energia solar em Hong Kong usando SIG e tecnologias de sensoriamento remoto. Locais adequados para a implantação de painéis fotovoltaicos solares, tais como telhados, foram delineados usando sensoriamento remoto, SIG e dados auxiliares existentes.

Nesse contexto, Angelis-dimakis et al. (2011) afirmam então que “existem vários bancos de dados sobre a radiação solar, empregando diferentes abordagens e métodos para identificar potenciais, teórico, e energia explorável”, os quais são descritos a seguir.

Tiba et al. (2010) descreve que “NREL é uma ferramenta de SIG, acessível via web, que permite a visualização de irradiação solar média mensal com uma resolução espacial de 40 km x 40 km (baixa resolução) e de 10 km x 10 km (alta resolução).”

Meteonorm é um banco de dados baseado em uma interpolação 3D da distância inversa das medições dos dados de radiação solar de estações meteorológicas e inclui dados sobre a radiação solar global, bem como a fração difusa e direta em uma extensão global. No entanto, abrange apenas o período compreendido entre 1981 –2000 e seu uso necessita ser licenciado (Angelis-dimakis et al, 2011).

SOLARGIS é um SIG usado para a eletrificação rural com fontes de energia renováveis. Sua metodologia tem por finalidade obter a melhor opção para a eletrificação rural em localidades isoladas usando sistemas renováveis ou não, sendo o usuário individual ou usuários conectados a uma rede local. Já foi aplicado em países como Tunísia, Marrocos, Itália, Espanha, Grécia, Cabo Verde, Brasil e Índia (Tiba et al., 2010).

Atlas de energia renovável do Oeste é uma ferramenta de SIG acessível via web que sintetiza os dados e mapas sobre as energias renováveis para onze estados americanos que se situam no oeste da América (Tiba et al., 2010).

PV-GIS é uma aplicação SIG que está disponível em tempo real via web para calcular a energia solar fotovoltaico potencial na Europa (Tiba et al., 2010).

Solar analyst é um módulo de extensão do software ArcGIS, que deriva de mapa de radiação solar com base nos dados de entrada de mapas de elevação digital e pode calcular a insolação integrada para qualquer período de tempo (FU; RICH, 2000). Vários outros fatores são também considerados durante o processo, como inclinação, aspecto, ângulo solar, sombra, topografia e atenuação atmosférica (Tiba et al., 2010).

Mesmo com uma diversificada rede de bases de dados para extração de dados de potenciais solares, Angelis-dimakis et al. (2011) ressaltam que o potencial estimado pode ser reduzido por não considerar limitações técnicas, econômicas e geográficas. Assim, técnicas de modelagem de análise multicritério usando SIG são ferramentas adicionais para estimativa real do potencial solar em um espaço geográfico.

### **3.6 Análise multicritério**

Carrión et al. (2008) descrevem em seu artigo um sistema de suporte à decisão ambiental para selecionar locais ótimos nos países que compõem a união européia para usinas de energia fotovoltaica conectadas à rede. Este sistema combina análise multicriterial e processo de hierarquia analítica com tecnologia de sistemas de informações geográficas (SIG) e, ao mesmo tempo, leva em consideração os fatores de ambiente, topografia, localização e clima.

Mapear áreas adequadas para exploração de fontes renováveis envolve o uso de uma variedade de fontes de dados em que os pesos são atribuídos com base em critérios geográficos. Para isso os dados são importados para um sistema de informação geográfica (SIG) que combina dados potencialmente não relacionados em uma maneira significativa. Pesos que enfatizam a importância relativa de um critério para outro podem ser atribuídas pelo usuário para melhorar a tomada de decisões (JANKE, 2010).

Janke (2010) descreve duas tipologias para a análise segundo critérios múltiplos em um modelo de dados: de vetor (representações discretas de ponto, linha e polígono) que envolve operadores booleanos de interseção e união. “Pode resultar em soluções rígidas onde uma

variável atende o critério ou não (interseção) ou muito liberal, onde os resultados serão incluídos, mesmo que uma única variável obedeça ao critério (união). Em um modelo de dados raster (matriz de células de tamanhos regulares, onde para cada célula é associado um conjunto de valores representando as características geográficas da região) há mais troca entre variáveis, onde uma baixa pontuação no critério pode ser compensada por um recorde no outro. Janke (2010) cita a preferência usada na literatura por uma combinação de modelos de dados para controlar o grau de substituição entre critérios.

Existem algumas técnicas descritas na literatura. Lógica booleana, por exemplo, é uma técnica que visa combinar camadas em um SIG, como descrita por Janke (2010). A combinação de camadas neste método baseia-se na lei de zero-um, onde a saída final do modelo é um mapa dividido em duas classes: totalmente apropriado (classe 1) e totalmente inadequado (classe 0).

Janke (2010) identificou as áreas que são apropriadas para vento e fazendas solares no Colorado usando técnicas multicritérios em um ambiente SIG. O autor ressalta que “o modelo de um SIG solar pode ser mais útil como um filtro para identificar as áreas que têm um maior grau de adequação em relação aos outros. ” Em adição, ressalta a necessidade de validação em campo das variáveis e propostas de localização encontradas em um SIG.

Para Latinopoulos e Kechagia (2015)

Sistemas de informação geográfica têm surgido nos últimos anos como uma ferramenta essencial para o ordenamento e gestão. A principal razão para isto é que o SIG pode ser usado no processo de planejamento, incorporando vários critérios de decisão sobre o uso do solo. Portanto, sua aplicação pode ser particularmente valiosa não apenas para visualização e gerenciamento de dados, mas também para a avaliação das alternativas de escolha, com base em critérios relacionados espacialmente. Por exemplo, no que diz respeito à avaliação de locais adequados para desenvolvimentos de fazenda de vento, SIG podem contribuir como uma ferramenta de suporte de decisão com o objetivo de identificar locais viáveis economicamente e ambientalmente, usando uma grande quantidade de dados espaciais relacionados com vários critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais.

Latinopoulos e Kechagia (2015) recomendam então a integração de um modelo de tomada de decisão de múltiplos critérios espaciais a um ambiente SIG. Dessa forma, avalia-se o potencial real de um recurso renovável, ou seja, o potencial estimado que pode ser realmente aplicado em um espaço apropriado ou viável. Funciona, portanto, como uma ferramenta de suporte de decisão útil para avaliar e gerenciar uma variedade de dados espaciais.

Zaidi et al. (2015) identificaram potenciais zonas de recarga das águas subterrâneas no noroeste da Arábia Saudita. Parâmetros, incluindo inclinação, textura do solo e qualidade das águas subterrâneas foram integrados em um ambiente SIG usando lógica booleana. Os resultados mostraram que a 17,90% da área total estudada é adequada para zonas artificiais de recarga de águas subterrâneas. As zonas identificadas foram integradas com o mapa de uso e ocupação do solo para evitar choque com terras agrícolas e habitadas, o que reduziu a área total potencial para 14.24%.

Anwarzai e Nagasaka (2017) examinaram os recursos disponíveis, quantificaram e utilizaram técnicas de tomada de decisão multicritério (MCDM) e SIG para o desenvolvimento de energias solar e vento no Afeganistão. Selecionaram os locais mais adequados por meio de critérios de acordo com os recursos, topografia, meio ambiente e pontos de vista econômicos como por exemplo, recursos de energia solar e vento terra uso, topografia, estrada de acesso, áreas protegidas, rios, lagos, e centros de carga para geração de energia solar.

O processo hierárquico analítico (AHP), proposto por Satty (1980), é uma outra ferramenta de decisão multi-critérios simples e matematicamente baseada para lidar com problemas complexos, não estruturados e multi-atributo. Saaty (2004) adaptou a AHP para a teoria geral do processo de rede analítica (ANP) que permite lidar com os benefícios, oportunidades, custos e riscos de uma decisão.

Uyan (2013) teve como objetivo em seu artigo determinar a seleção adequada de locais para instalação de fazendas solares, usando SIG e AHP na área de estudo. O modelo de índice final foi agrupado em quatro categorias como "baixo adequado", "moderado", "adequado" e "melhor adequado". A combinação de técnicas SIG e MCDM tem sido cada vez mais utilizada como um importante sistema de suporte à decisão espacial para avaliar locais adequados para exploração de energias renováveis.

Mardani et al. (2015) indicam sistematicamente em seu artigo as aplicações e metodologias das técnicas e abordagens do tipo MCDM, a qual é considerada uma ferramenta de decisão complexa envolvendo fatores quantitativos e qualitativos. A MCDM cresceu como parte da pesquisa operacional, preocupada em projetar ferramentas computacionais e matemáticas para apoiar a avaliação subjetiva de critérios de desempenho por tomadores de decisão (MARDANI et al., 2015).

Mardani et al. (2015) descrevem que,

Os métodos MCDM foram projetados para designar uma alternativa preferida, classificar alternativas em um pequeno número de categorias e / ou classificar

alternativas em uma ordem de preferência subjetiva. O MCDM é um termo genérico para todos os métodos que existem para ajudar as pessoas a tomar decisões de acordo com suas preferências, nos casos em que há mais de um critério conflitante. A maioria dos métodos MCDM lidam com alternativas discretas, que são descritas por um conjunto de critérios. Os valores dos critérios podem ser determinados como uma informação cardinal ou ordinária. As informações podem ser determinadas exatamente ou podem ser difusas, determinadas em intervalos.

Em sua extensa revisão, Mardani et al. (2015) mostram que a linha de energia, meio ambiente e sustentabilidade é o segundo campo em aplicações de métodos MCDM, enquanto SIG aparece em oitavo lugar. No campo de energia, há abordagens incluindo: políticas energéticas, planejamento de recursos energéticos e energia renovável. No campo do meio ambiente, fatores e produção ambiental, sistema de gestão e qualidade eco-ambiental lideram. No domínio da sustentabilidade: sustentabilidade dos riscos, do governo, dos transportes, do hidrogênio e sistemas de pisos sustentáveis. No campo de SIG, vários estudiosos empregaram técnicas e abordagens MCDM envolvendo vários sub-campos específicos, incluindo: SIG; mapeamento de susceptibilidade ao deslizamento de terra, ArcGIS e locais para instalação de fazendas solares com base em SIG.

Aly et al. (2017) investigam em seu estudo a adequação espacial para instalações de energia solar em grande escala na Tanzânia através da utilização de análise de sistema de informação geográfica combinada com a técnica de tomada de decisão de critérios múltiplos (MCDM). O estudo identifica seis critérios de exclusão para identificação de áreas inadequadas. O processo hierárquico analítico (AHP) é usado para determinar os pesos dos sete critérios de classificação identificados. Como produto, há um mapa final de adequação que categoriza todas as áreas não-excluídas em áreas mais adequadas, apropriadas, moderadamente adequadas e menos apropriadas. O estudo também sugere quatro locais específicos para instalações de energia solar concentrada (CSP) e para instalações de energia fotovoltaica (PV). Aly, Jensen e Pedersen (2017) destacam que uma metodologia baseada na integração entre SIG e MCDM pode ser aplicada a investigações semelhantes em outras regiões e utilizada para avaliar a adequação espacial de outras tecnologias de energia renovável.

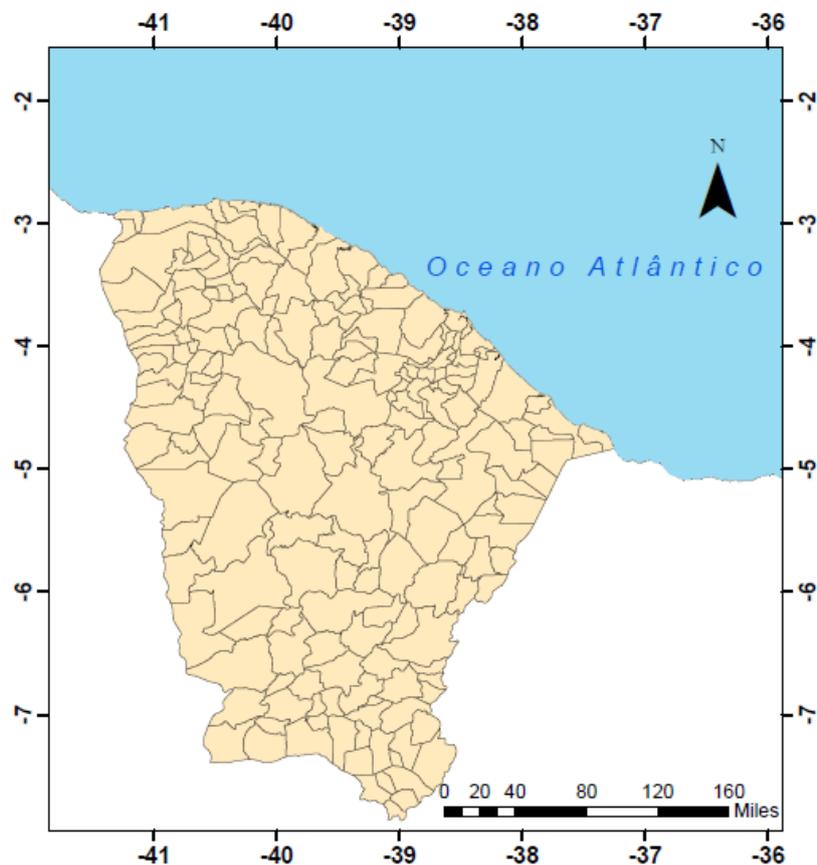
## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

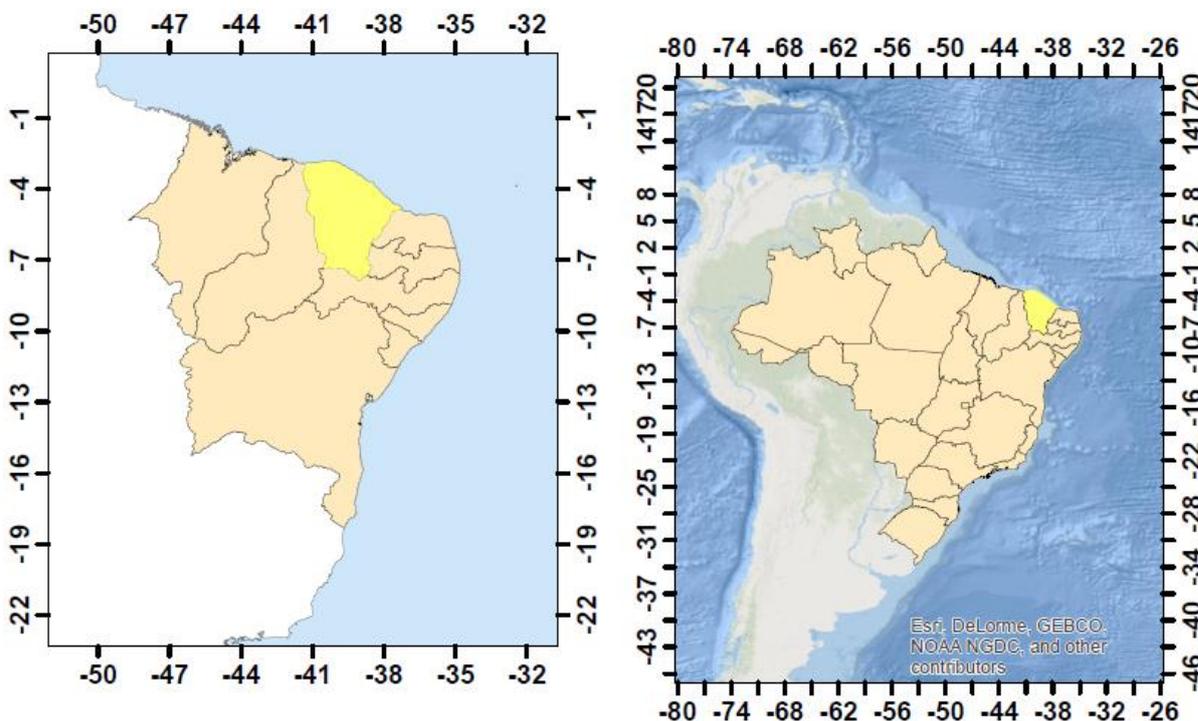
Neste trabalho foi aplicada uma análise combinada entre SIG e a técnica MCDM com vistas a identificar locais apropriados para instalação de energia solar de pontos de tecnologia do tipo CSP e PV no Ceará conforme metodologia proposta por Aly, Jensen e Pedersen (2017). Este capítulo será dividido em três subseções, as quais retratam respectivamente do enquadramento geográfico da área de estudo, a metodologia SIG e a MCDM. Em primeiro lugar, serão explicados critérios de exclusão (CE) usados para mascarar áreas inadequadas para energia solar em grande escala, então o método AHP (uma das técnicas MCDM) será usado para pesar as decisões de agrupamento (DA) e seus Critérios de Classificação (CC).

### 4.1 Área de Estudo

O Estado do Ceará está localizado na região nordeste do Brasil, entre a longitude  $37^{\circ} 14' 54''$  W a  $41^{\circ} 24' 45''$  W e latitude  $02^{\circ} 46' 50''$  S a  $07^{\circ} 52' 15''$  S. Possui uma área de 148,8 mil Km<sup>2</sup> e um extenso litoral de 573 km (Figura 7).

Figura 7 – Enquadramento geográfico do Estado do Ceará.





### Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum SIRGAS 2000

Autor: Diego Andrade Almeida

Ano: 2017

Conforme o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE) o clima predominante no estado é o Tropical Quente Semiárido, abrangendo 98 (53%) das 184 sedes municipais. Esse tipo climático possui características de escassez e irregularidade pluviométrica associado a altas taxas de evapotranspiração, condições que tornam o estado susceptível ao fenômeno das secas.

Morais et al (2004) descrevem que para o Ceará

a umidade relativa no ar apresenta um padrão de variação semelhante ao da precipitação com variação máxima de 12% referente aos meses de abril (85%) e outubro (73%). A insolação é bastante intensa na área litorânea, atingindo uma média anual de 3000 horas, sendo mais forte no mês de outubro decrescendo no mês de março (180 h e 4 décimos) o que corresponde nos períodos secos uma incidência solar média diária em torno de 8 horas/dia. Nos períodos chuvosos este valor situa-se por volta de 6 horas/dia. Em virtude do elevado teor de insolação, as médias mensais de evaporação são também bastante elevadas, perfazendo entre o ano de 2001 e 2002 o total de 1.472 mm, com valores máximos entre os meses de agosto a novembro.

Segundo Brandão (2014) “na geografia física do estado do Ceará destaca-se um amplo predomínio espacial das superfícies aplainadas da depressão sertaneja [...] com o predomínio de vastas superfícies aplainadas.” Os sertões são, portanto, a área geográfica típica

do semiárido cearense. Para Albuquerque et al. (2014) estes são como um vasto compartimento de relevo embutido entre os níveis de planaltos cristalinos ou sedimentares.

Ainda, possui uma população estimada para 2017 segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 9 milhões de habitantes, dos quais cerca de 2 milhões se encontram em zona rural.

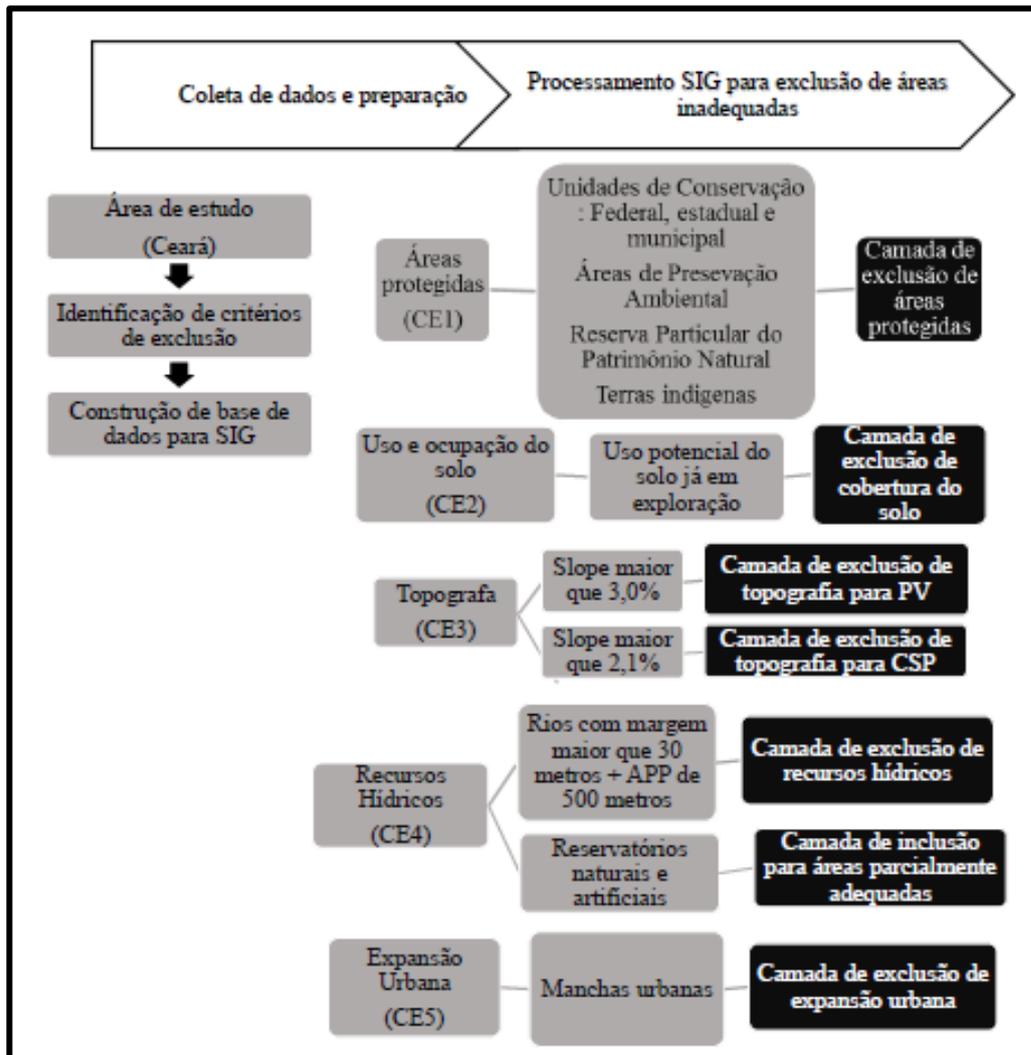
## 4.2 Análise SIG

O primeiro passo da análise SIG é excluir as áreas que não são adequadas para a instalação de grandes usinas de energia solar. Isto foi realizado tomando como base critérios de exclusão (CE), os quais objetivam inicialmente reduzir a área útil disponível para exploração. A análise dos critérios de exclusão geralmente depende da disponibilidade dos dados espaciais e da cobertura geográfica da área de estudo, além de ser regido por legislações ambientais específicas.

Todas as digitalizações, conversões e análises dos dados espaciais foram realizadas utilizando o software comercial *ArcMap* (versão 10.2.2) do *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Grande parte dos arquivos shapes foram concedidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Os seguintes critérios de exclusão (CE) foram utilizados nesta pesquisa: áreas protegidas (CE1), uso e ocupação do solo (CE2), topografia (CE3), corpos hídricos (CE4) e expansão urbana (CE5). Estes fatores são notadamente compreensivos quando se comparado com a literatura relevante e especializada (Dawson e Schlyter, 2012; Castillo et al. 2016; Hermann et al., 2014). Os seguintes parágrafos descrevem as etapas e relevância de cada um dos cinco critérios de exclusão identificados. A Figura 8 ilustra os materiais e procedimentos metodológicos usados nesta etapa.

Figura 8 – Procedimento metodológico utilizado neste estudo, baseado em SIG, para exclusão de áreas inaptas.



#### 4.2.1 Áreas protegidas (CE1)

A informação sobre as áreas protegidas baseia-se em dados fornecidos pela FUNCEME. Estas áreas protegidas englobam unidades de conservação (UC's), mosaicos e corredores ecológicos. As Unidades de Conservação (UC) são “áreas naturais protegidas que possuem características naturais relevantes, com objetivos de conservar a biodiversidade e outros atributos naturais nelas contidos, com o mínimo de impacto (MMA,2018).” De acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) as UCs são organizadas em dois grupos – Proteção Integral e Uso Sustentável – conforme possibilidade de uso indireto ou direto dos recursos naturais presentes, subdividindo-as em 12 categorias, cada uma com objetivos e características específicas. As UCs de Proteção Integral são aquelas em que a prioridade é a preservação da natureza, obedecendo a normas mais restritivas. Nelas é permitida apenas a

utilização indireta dos recursos naturais, ou seja, sem consumo, coleta ou qualquer tipo de dano ambiental. Já nas UCs de Uso Sustentável, a conservação da natureza é aliada ao uso de parcela de seus recursos ambientais, desde que a continuidade da biodiversidade e dos processos naturais da área sejam garantidas. Dependendo da categoria a que pertence a UC, podem ou não ser permitidas atividades humanas, podendo haver a necessidade de autorização ou de licenciamento do órgão ambiental competente. No entanto, para este estudo foram excluídas todas as áreas de proteção independente da sua possibilidade de uso, uma vez que o objetivo da pesquisa é identificar áreas propícias disponíveis para exploração. Aqui também foram excluídas áreas indígenas demarcadas dentro do território cearense.

#### **4.2.2 Uso e ocupação do solo (CE2)**

Energia solar em grande escala requer áreas de terra relativamente grandes em comparação com outras tecnologias de geração de eletricidade. Para isso é importante identificar locais sem outros potenciais de usos produtivos, de forma a garantir que não ocorra competição com áreas destinadas a fins agrícolas, extrativistas ou com outra importância. Foram utilizadas as informações disponíveis em shape da Funceme como dados de uso e ocupação do solo já exploradas no Ceará para o ano de 2009, sendo excluídas áreas destinadas a agricultura, agricultura e pecuária com irrigação, agricultura e remanescentes florestais e agroextrativismo.

#### **4.2.3 Topografia (CE3)**

Existe uma relação de favorabilidade de exploração de energia solar em terrenos considerados planos. Na literatura há um consenso de que para exploração de energia do tipo CSP são ideais terrenos com declividade de até 2,1% (TRIEB et al, 2009), no entanto não há consenso na porcentagem de inclinação aceita para plantas fotovoltaicas. Uyan (2013) excluiu terras com declives superiores a 3%, Charabi e Gastli (2011) utilizaram valores superiores a 5%, Cohen, Skowronski e Cable (2005) declives maiores do que 5,24%, e Noorollahi et al. (2016) utilizou o valor de 11% como descarte. Terrenos do tipo semi-plano são favoráveis para instalações de usinas solares, no entanto a construção de plantas fotovoltaicas em grande escala em terras com declives íngremes leva a um aumento significativo no custo final do projeto com gastos em capital e manutenção (ALY; JENSEN; PEDERSEN, 2017).

Neste estudo, as terras com inclinações mais elevadas do que 8,0% foram excluídas para a construção de plantas fotovoltaicas, o que corresponde a áreas classificadas como planas e suavemente onduladas (EMBRAPA, 1979) com o intuito de assegurar a classificação de

terrenos semi-planos conforme o trabalho de ALY; JENSEN; PEDERSEN (2017) . O mapa de declividade foi derivado do modelo digital de elevação (MDE) da Missão topográfica do radar de transferência da NASA (SRTM), os dados foram fornecidos com uma resolução espacial de 30 m no equador. Foi utilizada ferramenta slope e criada um reclassificação do relevo para as declividades adotadas para energia CSP e fotovoltaica.

#### **4.2.4 Recursos Hídricos (CE4)**

Foram utilizados aqui todos os rios de margem dupla bem como espelhos d'água de reservatórios naturais e artificiais localizados no Estado do Ceará. Foram identificados 41 corpos hídricos com margem maior que 30 metros. Para estes rios foi dado um buffer de 500 metros como forma de atender ao critério mais exigente para Área de Preservação Permanente (APP) de margens de rios segundo a legislação ambiental vigente. Estas áreas foram classificadas em:

- Inadequadas - correspondentes aos rios de margem dupla mais a faixa de buffer;
- Parcialmente adequadas - reservatórios superficiais, caso se adote a instalação de placas solares sobre área correspondente ao espelho d'água. Sacramento et al. (2015), por exemplo, construíram em seu trabalho cenários para o uso de plantas fotovoltaicas flutuantes em reservatórios brasileiros. Afirmam que de acordo com esses cenários, o potencial de produção de PV em uma fração da área ocupada por três reservatórios - Castanhão, Orós e Banabuiú, forneceria 7,4 e 18,8% da demanda de eletricidade do estado brasileiro do Ceará (8,84 milhões de habitantes) e sua maior cidade de Fortaleza (2,6 milhões de habitantes), respectivamente.
- Adequadas - restante do estado.

#### **4.2.5 Expansão urbana (CE5)**

O Ceará terá um acréscimo populacional esperado até 2030 de cerca de 522.000 habitantes, totalizando uma estimativa de 9.566.063 habitantes num horizonte de 13 anos. Desde 2006 o estado apresenta taxa de crescimento inferior à média nacional.

Espera-se um incremento na expansão de áreas urbanas territoriais, onde os centros urbanos existentes não só deverão expandir-se horizontalmente, mas também verticalmente. Aqui foram excluídos áreas de machas urbanas provenientes de informações coletadas pela Funceme para o ano de 2009, embora mesmo nestas áreas seja possível a exploração solar em pequena escala, o que foge dos objetivos desta pesquisa.

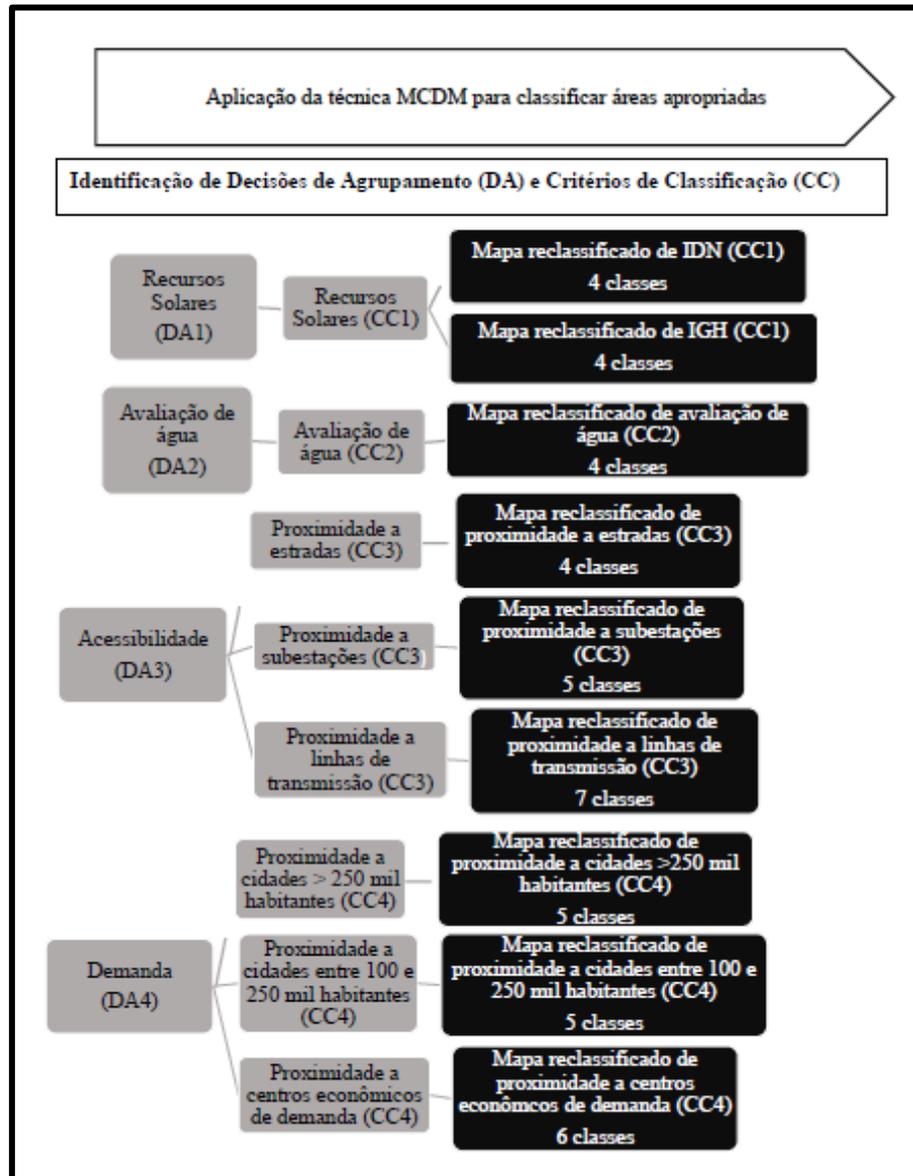
### 4.3 Classificação de áreas adequadas

Depois de excluir as áreas inadequadas para instalações de energia solar em larga escala, a técnica MCDM foi usada para identificar locais ótimos para instalações do tipo PV e CSP. A seleção dos critérios de classificação é um passo essencial, seguido da determinação de pesos justificáveis para cada critério de decisão, de forma a zonear as áreas adequadas em diferentes graus de viabilidade. Os critérios de classificação e seus respectivos níveis foram identificados com base em importantes revisões da literatura (BREWER et al., 2015; TAHRI et al.; 2015; DAWSON; SCHLYTER, 2012; VAFAEIPOUR et al., 2014).

Foram identificados sete critérios de classificação (CC): recursos solares (CC1), disponibilidade de água (CC2), proximidade com rodovias (CC3), proximidade com rede elétrica (CC4), proximidade com cidades com mais de 250.000 habitantes (CC5), proximidade com cidades com 100 mil a 250.000 habitantes (CC6) e proximidade a centros econômicos de demanda (CC7). O número de níveis para cada CC é determinado de forma distinta com base na importância relativa de cada nível dentro de cada CC. Por exemplo, o limiar de 500 kWh / m<sup>2</sup> anualmente foi identificado para CC1, pois indica uma mudança significativa da radiação solar que influencia a geração de eletricidade em grande escala (FICHTER; TRIEB; MOSER, 2013). Isso levou a definir quatro camadas para "RC1 - IDN anual "e para" RC1 - IHG anual ", O valor mais alto de IDN anual obtido do mapa é de 6000 kWh / m<sup>2</sup> e o menor de 4395 kWh / m<sup>2</sup> enquanto o valor IHG anual está dentro de 5300 kWh / m<sup>2</sup> e 6000 kWh / m.

A Figura 9 apresenta esquematicamente o procedimento metodológico utilizado neste estudo, baseado em SIG, para identificação de aptidão de áreas à instalação de sistemas de energia solar.

Figura 9 – Procedimento metodológico utilizado neste estudo, baseado em SIG, para identificação de aptidão de áreas à instalação de sistemas de energia solar.



#### 4.3.1 Recursos solares (CC1)

A viabilidade da instalação de plantas CSP depende, dentre outras coisas, do fornecimento de Irradiação Normal Direta (IND) anual de mais de 1800 kWh/m<sup>2</sup> e as plantas PV requerem Irradiação Horizontal Global (IHG) anual superior a 1700 kWh/m<sup>2</sup> (ALY; JENSEN; PEDERSEN, 2017). Valores menores que esses podem ser considerados como critérios de exclusão para identificar áreas apropriadas em várias localidades, no entanto no

Ceará os recursos solares se configuram apenas como critério para categorização, uma vez que se possui o atendimento desse requisito.

A informação sobre os recursos solares no Ceará é baseada em dados fornecidos pelo *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*, iniciativa da *United Nations Environment Programme (UNEP)* que reúne conjuntos de dados de recursos de energia solar e eólica e ferramentas de análise de várias organizações internacionais, entre elas o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais do Brasil (INPE). Para isto, o INPE e o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LBSOLAR/UFSC) desenvolveram o modelo computacional BRASIL-SR, o qual utiliza imagens dos satélites geoestacionários GOES 8 e 12 empregado no levantamento dos recursos de energia solar do país. Os dados possuem uma resolução espacial de  $0,155^\circ$  (isto é, 12,5 km x 15,5 m) para o período de 1999 a 2014 (Pereira et al, 2017). Os mapas de IND e IHG obtidos foram reclassificados para representar intervalos com diferença de radiação anual de 50 e 200 kWh/ m<sup>2</sup> respectivamente.

#### **4.3.2 Disponibilidade de água (CC2)**

As instalações CSP usam água para processos de ciclo de vapor, para limpeza de espelhos ou heliostatos e para o resfriamento de torres de resfriamento, caso estas sejam usadas (TURCHI et al.,2010). De acordo com o *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* dos Estados Unidos (TURCHI et al.,2010), uma planta CSP com parabólica refrigerada a água consome, em média, 3274 L/mWh, onde a maior parte da água é utilizada para os processos de resfriamento do ciclo de vapor. Conseqüentemente, as plantas CSP são altamente recomendadas para serem construídas próximas a locais com boa disponibilidade de água . Neste estudo, apenas os principais lagos da Tanzânia foram considerados como fontes de água elegíveis para alimentar plantas de CSP refrigeradas a úmido, a fim de evitar competir com as necessidades de irrigação de pequenos rios e córregos. As plantas fotovoltaicas requerem quantidade mínima de água, principalmente para limpeza eventual de seus painéis, daí a disponibilidade de água (CC2) ser considerada entre os critérios de classificação apenas para instalações CSP (MACKNICK et al., 2011). Foi-se utilizado a ferramenta Multiple Ring Buffer do Arcgis para classificar a proximidade aos principais rios do Ceará.

### **4.3.3 Acessibilidade**

A acessibilidade inclui proximidade com estradas (CC3) e proximidade com a rede elétrica (CC4) como indicadores da infraestrutura existente que facilite a construção e a integração de grandes usinas de energia solar. A instalação de energia solar de grande porte em local com pouca acessibilidade leva ao aumento significativo nas despesas de capital, resultando em custos adicionais para o já elevado investimento inicial de tais projetos.

#### **4.3.3.1 Proximidade a estradas (CC3)**

Instalação e manutenção de parques eólicos e solares requerem acessos de veículos de pequeno, médio e grande porte. Desta forma a proximidade a estradas existentes é considerada um fator econômico, evitando o custo adicional da construção rodoviária e seus danos associados ao meio ambiente. As informações sobre infraestrutura rodoviária são baseadas em dados fornecidos pela Funceme. As estradas principais foram validadas junto ao mapa mais recente do Departamento Estadual de Rodovias do Ceará (DER/CE) disponível em seu site oficial em maio de 2017 (CEARÁ, 2017). Foi-se utilizado a ferramenta Multiple Ring Buffer do Arcgis para classificar a proximidade das rodovias em intervalos de 5 a 25 km e depois reclassificados em intervalos de 5 km. O limiar de 5 km foi identificado para CC3, pois indica uma mudança significativa do custo necessário para construir uma nova estrada (FICHTER et al.,2013). Locais a mais de 20 km longe da estrada existente exigirá custos elevados e dispendiosos para a construção de novas estradas, portanto, são totalmente desfavoráveis.

#### **4.3.3.2 Proximidade com rede elétrica (CC4)**

Energia solar em grande escala requer proximidade a linhas de transmissão para escoamento da energia elétrica produzida em grandes tensões. Considerando o alto custo associado à construção de linhas de transmissão de energia, a proximidade a esta rede existente ajuda a evitar custo de capital e perdas de energia. As informações sobre linhas de transmissão foram obtidas através do Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL) disponibilizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL,2018). Foi identificada a rede inserida dentro da área de estudo, o que corresponde a linhas de corrente alternada com tensão de 230 e 500 kv. As distâncias foram identificadas e categorizadas no ArcGis com

intervalos de 5 km em 5 classes e usado o intervalo com valores superiores a 40 km para a sexta classe.

#### **4.3.4 Demanda**

A demanda inclui proximidade com cidades com mais de 250.000 habitantes (CC5), proximidade com cidades com 100.000 a 250.000 habitantes (CC6) e proximidade a centros econômicos e industriais (CC7) como indicadores dos centros de demanda. Há que considerar que a instalação de energia solar em grande escala na localização perto do centro de demanda reduz as perdas de transmissão em relação à rede de serviços públicos, Além, a proximidade do centro de demanda é muito desejável para grades isoladas autônomas que alimentam cargas longe da rede de serviços públicos existente.

##### **4.3.4.1 Proximidade a cidades com mais de 250.000 habitantes (CC5)**

Uma curta distância entre a oferta e a demanda, conforme Aly, Jensen e Pedersen (2017) reduz as perdas de energia e o congestionamento na rede de transmissão e minimiza o custo da transmissão, evitando a necessidade de linhas de transmissão longas e dispendiosas. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o ano de 2017, o Ceará possui três cidades com esta característica: Fortaleza, Caucaia e Juazeiro do Norte. As distâncias foram identificadas e categorizadas no ArcGis a partir de shape com a localização das sedes municipais e levantado intervalos de 10 km em 4 classes e usado o intervalo com valores superiores a 40 km para a quinta classe.

##### **4.3.4.2 Proximidade a cidades com 100.000 a 250.000 habitantes (CC6)**

Algumas cidades com uma população entre 100.000 e 250.000 pessoas no Ceará são centros de carga relevantes como redes isoladas autônomas, especialmente quando estão longe de uma rede de serviços públicos existentes. O limite de 100.000 habitantes é considerado suficientemente grande para estar disponível para promover o investimento em plantas solares em grande escala, uma vez que estas cidades também possuem uma infraestrutura requerente de energia elétrica considerável como apoio a população existente. Segundo dados do IBGE para o ano de 2017, o Ceará possui seis cidades com esta característica: Sobral, Maracanaú, Maranguape, Crato, Iguatu e Itapipoca. As distâncias foram identificadas e categorizadas no

ArcGis a partir de shape com a localização das sedes municipais e levantado intervalos de 10 km em 4 classes e usado o intervalo com valores superiores a 40 km para a quinta classe.

#### **4.3.4.3 Proximidade a centros econômicos de demanda (CC7)**

Enquanto nos dois tópicos anteriores foi avaliada a distância a centros de demanda do ponto de vista populacional, aqui foi considerada a proximidade a centros que, pelo desenvolvimento de sua atividade, apresentam-se como essenciais consumidores de energia elétrica e cuja importância econômica é essencial para as finanças estaduais. Em pesquisa ao portal da Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE) foram identificados importantes projetos econômicos cuja manutenção de atividades requer grande quantidade de energia, os quais são: Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), Produção mineral de fosfato e urânio na Usina de Itaitaia em Santa Quitéria, Produção mineral de cobre em Viçosa do Ceará, Polo Industrial e Tecnológico da Saúde em Eusébio, Polo industrial químico em Guaiúba e Distrito Industrial de Maracanaú. Foram considerados ainda os dez municípios com maior número de indústrias ativas no período de 2013 a 2015 (IPECE, 2018), os quais são: Aquiraz, Caucaia, Crato, Eusébio, Fortaleza, Iguatu, Juazeiro do Norte, Maracanaú, Maranguape e Sobral. Foram realizados buffers sucessivos a partir do shape contendo pontos para a localidade destes 14 municípios.

#### **4.4 Aplicação método *Analytic Hierarchy Process* (AHP)**

Esta pesquisa tem como objetivo identificar áreas adequadas para alocação e aproveitamento da energia solar (CSP e PV) no Estado do Ceará avaliando fatores e condições que possam interferir na escolha de localidades geográficas analisando múltiplos critérios envolvidos nessa tomada de decisão. Foi utilizado o Método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchic Process – AHP*) como ferramenta para tomada de decisão multicritério (MCDM) com o objetivo de categorizar as áreas disponíveis para exploração de recursos solares.

Os pesos de cada variável foram estabelecidos com referência ao trabalho executado por ALY; JENSEN; PEDERSEN (2017). A Tabela 1 mostra os pesos gerais dos critérios de classificação obtidos através da aplicação do método AHP para tecnologias CSP e PV. Uma pontuação quantitativa foi atribuída a cada nível, representando sua aptidão relativa para ter uma instalação de energia solar em larga escala (ao nível menos favorável é atribuído um valor de 0, enquanto que ao nível mais eficiente é atribuído um valor de 100).

**Tabela 1 – Valores de critérios de classificação conforme método proposto por Aly et al. (2017)**

<b>CC1 - IND anual</b>		
Classes	IDN (kWh/m <sup>2</sup> )	Valor
1	5501 - 6000	100
2	5001 - 5500	95
3	4501 - 5000	90
4	4395 - 4500	85

<b>CC1 - IGH anual</b>		
Classes	IGH (kWh/m <sup>2</sup> )	Valor
1	5801 - 6000	100
2	5601 - 5800	95
3	5401 - 5600	90
4	5300 - 5400	85

<b>CC2 – Distância a subestações</b>		
Classes	Distância (km)	Valor
1	5 - 10	100
2	10 - 20	80
3	20 - 30	60
4	30 - 40	40
5	Mais de 40	0

<b>CC2 – Distância a rodovias</b>		
Classes	Distância (km)	Valor
1	5 - 10	100
2	10 - 20	80
3	20 - 30	60
4	30 - 40	40
5	Mais de 40	0

<b>CC3 – Distância a linhas de transmissão</b>		
Classes	Distância (km)	Valor
1	0 - 5	100
2	5 - 10	80
3	10 - 15	60
4	15 - 20	40
5	20 - 30	20
6	30 - 40	10
7	Mais de 40	5

<b>CC4 – Distância a centros econômicos de demanda</b>		
Classes	Distância (km)	Valor
1	0 - 8	100

2	8 - 10	90
3	10 - 20	70
4	20 - 30	50
5	30 - 40	30
6	Mais de 40	10

**CC5 – Distância a cidades com 100 a 250 mil habitantes**

Classes	Distância (km)	Valor
1	0 - 10	100
2	10 - 20	90
3	20 - 30	70
4	30 - 40	50
5	Mais de 40	30

**CC6 – Distância a cidades com mais de 250 mil habitantes**

Classes	Distância (km)	Valor
1	0 - 10	100
2	10 - 20	90
3	20 - 30	70
4	30 - 40	50
5	Mais de 40	30

Cada variável influencia de forma diferente a viabilidade para exploração de energia solar. Os critérios de decisão (Tabela 02) visam a retratar o peso de cada fator para sua instalação. Dessa forma estes percentuais são multiplicados pelo valor de cada critério de classificação. Obtém-se então uma média final de 0 a 100 para identificação das áreas mais adequadas (75 a 100), adequadas (50 a 75), moderadamente adequadas (25 - 50) e pouco adequadas (0 - 25).

**Tabela 2 – Valores de critérios de decisão conforme método proposto por Aly et al. (2017)**

<b>Critério de Decisão</b>	<b>Critério de Classificação</b>	<b>Peso</b>
Acessibilidade (CD2)	Proximidade a rodovias (CC2)	20,0%
	Proximidade a subestações (CC3)	25,0%
	Proximidade a linhas de transmissão (CC4)	25,0%
Demanda (CD3)	Proximidade a cidades entre 100 e 250 mil habitantes (CC5)	10,0%
	Proximidade a cidades com mais de 250 mil habitantes (CC6)	10,0%
	Proximidade a centros econômicos de demanda (CC7)	10,0%

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Ceará possui poucas áreas protegidas as quais são encontradas nas regiões de maiores altitudes, compostas por serras e chapadas (Figura 10a).

É evidenciado, no entanto, uma grande parcela da área total do estado ocupada por solos com potencial para fins agricultáveis em exploração (Figura 10b). Esta pesquisa concentrou-se em adotar este critério completamente exclusivo com o intuito de mostrar áreas adequadas sem competir com outras atividades econômicas para avaliação do potencial solar do estado.

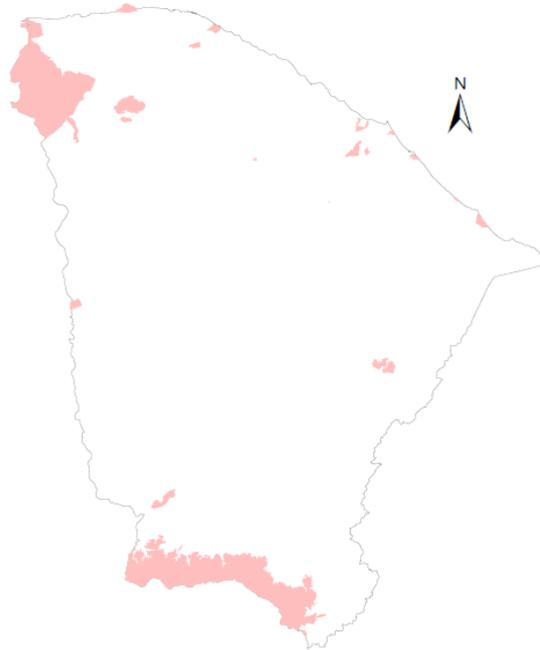
A diferença de topografia necessária para exploração CSP (Figura 10c), difere em poucos pontos isolados para os que são requisitos para a tecnologia PV (Figura 10d), sendo esta última possuidora de mais áreas aptas (declividade  $< 3,0\%$ ) do que a primeira (declividade  $< 2,1\%$ ).

Os rios e suas APP's apresentam uma contribuição mínima de áreas inadequadas para exploração solar (Figura 10e). No entanto, existe uma extensa rede disseminada de reservatórios cujo uso do espelho d'água para aproveitamento da energia solar pode contribuir para oferta de energia elétrica sustentável e eletrificação rural de comunidades e pequenos aglomerados populacionais. Além, estações de tratamento de água conectadas a reservatórios demandam uma grande quantidade de energia para funcionamento de filtros e bombas, podendo ser beneficiadas com a instalação de painéis fotovoltaicos em espelhos d'água.

Áreas ligadas a mancha urbana foram excluídas, no entanto estimar a expansão das cidades em termos horizontais é inviável diante da verticalização constante nas mesmas, por isso foram desconsideradas apenas áreas reais dos centros urbanos, os quais são caracterizados pela região metropolitana de Fortaleza e a região sul do Ceará (Figura 10f). É importante ressaltar que embora essas áreas sejam excluídas para aproveitamento solar em grande escala ainda apresentam importante contribuição para mini geração fotovoltaica.

Figura 10 – Áreas de exclusão para mapeamento do potencial de energia solar no Ceará

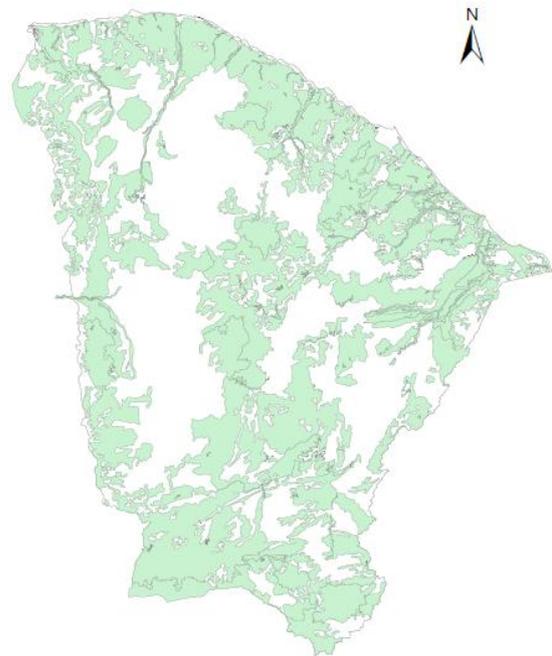
a. Áreas protegidas



**CE1**

Áreas protegidas

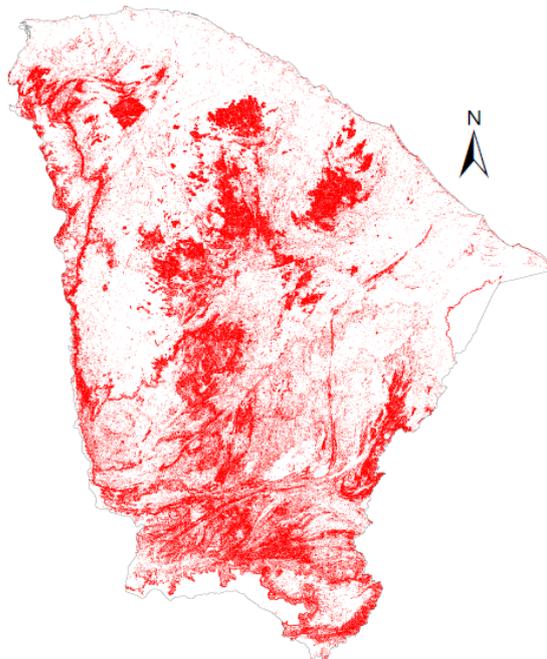
b. Uso e ocupação do solo



**CE2**

Áreas com solo potencial já explorado

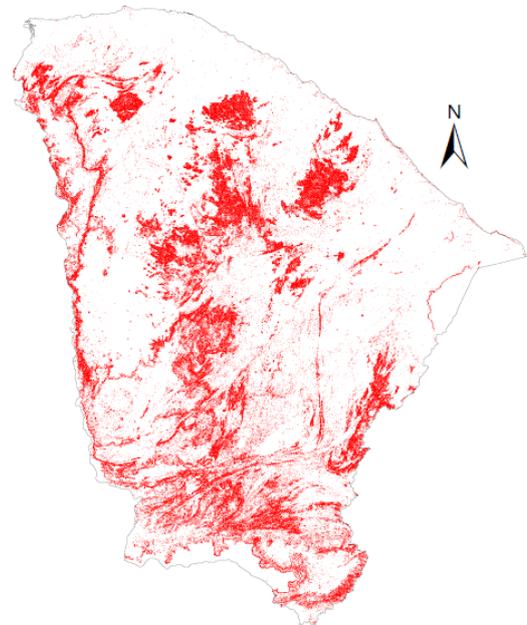
c. Topografia (CSP)



**CE3 - CSP**

Topografia > 2.1%

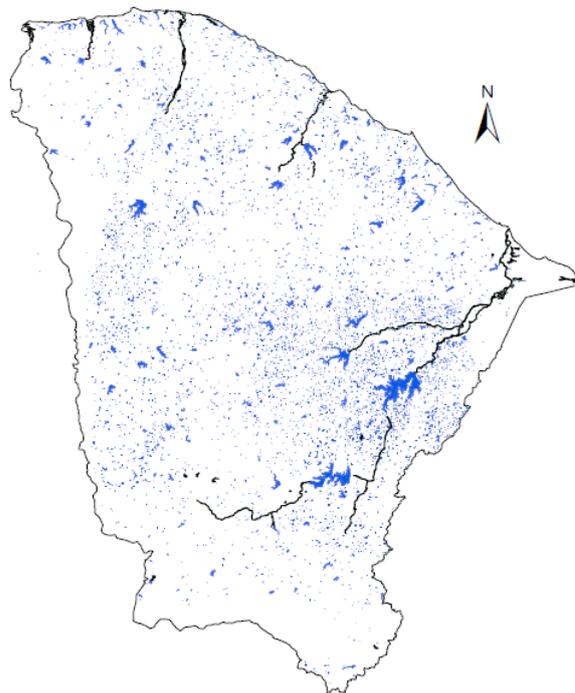
d. Topografia (PV)



**CE3 - PV**

Topografia > 3%

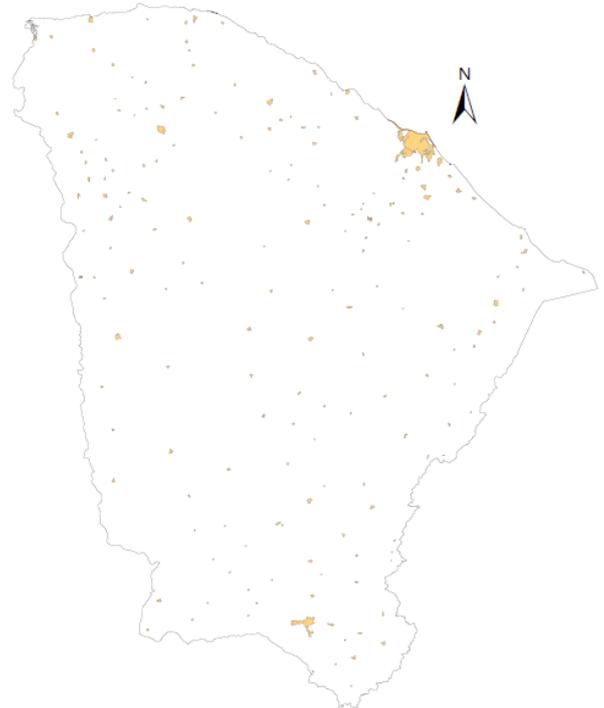
### e. Recursos Hídricos



#### CE4

- Áreas inadequadas
- Áreas parcialmente adequadas
- Áreas adequadas

### f. Expansão Urbana

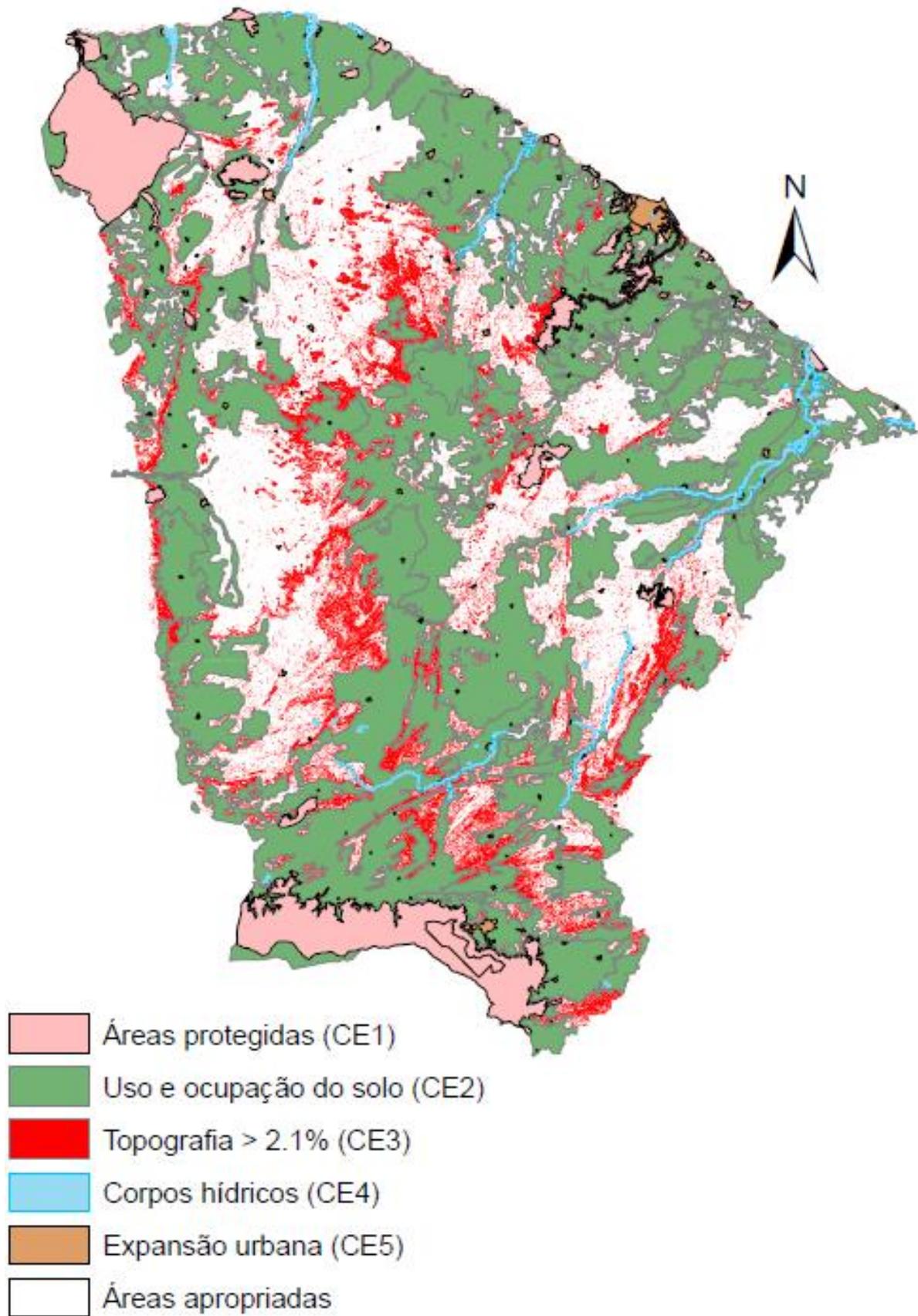


#### CE5

- Áreas inadequadas pela expansão urbana

O critério topográfico ainda pode dar margem a manchas de áreas disponíveis ao se admitir custos maiores no projeto para assumir declividades maiores que 3%. Na condução desta pesquisa observou-se que a escolha por maiores declividades não gera incrementos significantes em termos de área. Pode-se verificar isso através da máscara de exclusão para tecnologia CSP que requer declividade não superior a 2,1% (Figura 11). Observou-se que o Estado possui uma quantidade considerável de terras (mais de 60 % do território) com condições adequadas para exploração de energia no solar. Não obstante, evidencia-se que ao optar pelo incentivo e implantação de tecnologia CSP, o Ceará, o qual sofre com pouca disponibilidade hídrica, estaria criando mais uma questão de conflito pelo uso da água, sendo a tecnologia PV, portanto, a forma de exploração da radiação solar a mais sustentável para a preservação de seus recursos hídricos. É importante que isso seja levado em consideração no estabelecimento de políticas públicas de incentivo ao uso de energia solar para que se caminhe na construção de alternativas com viabilidade de potencial mas também de uso e operação. Desta forma, os resultados desta pesquisa irão ser concentrados e melhor aprofundados na exploração fotovoltaica de áreas apropriadas.

Figura 11 – Máscara de exclusão para instalações do tipo CSP em grande escala no estado do Ceará.



Após aplicação dos critérios de exclusão para zoneamento para exploração fotovoltaica, se observou uma efetiva redução da área total do Ceará em virtude majoritariamente do uso e ocupação de terras para fins agrícolas (Figura 12). O objetivo deste estudo, no entanto, é avaliar o potencial de exploração em áreas adequadas sem competir com a vocação econômica de outras atividades exercidas na ocupação do solo. Foi possível identificar um conjunto de áreas adequadas de 62.110 km<sup>2</sup> (aproximadamente 58% do total do território cearense) para exploração fotovoltaica (Figura 13). Maiores disponibilidades foram encontradas nos municípios localizados na região do Sertão de Inhamuns, Sertão Central e parte do Litoral Leste-Jaguaribe .

O Ceará não apresenta, em termos de área, uma disparidade entre locais mais adequadas para exploração CSP do que com PV. Isso se deve ao fato de além de as condições de exclusão serem atenuantes para as duas, as condições topográficas do estado não se sobressaíram diante dos requisitos específicos de cada tecnologia solar. Ratificando as condições climatológicas do estado, é importante ressaltar que mesmo possuindo uma rede de reservatórios e levando isso a ser um critério favorável para tecnologia CSP, esta não avalia fatores intervenientes como a variabilidade temporal dos volumes acumulados, demandas hídricas na área e conflitos pelo uso da água. Desta forma, a exploração PV é o melhor caminho para conversão da radiação solar em energia elétrica no território cearense.

Figura 12 – Máscara de exclusão para instalações do tipo PV em grande escala no estado do Ceará.

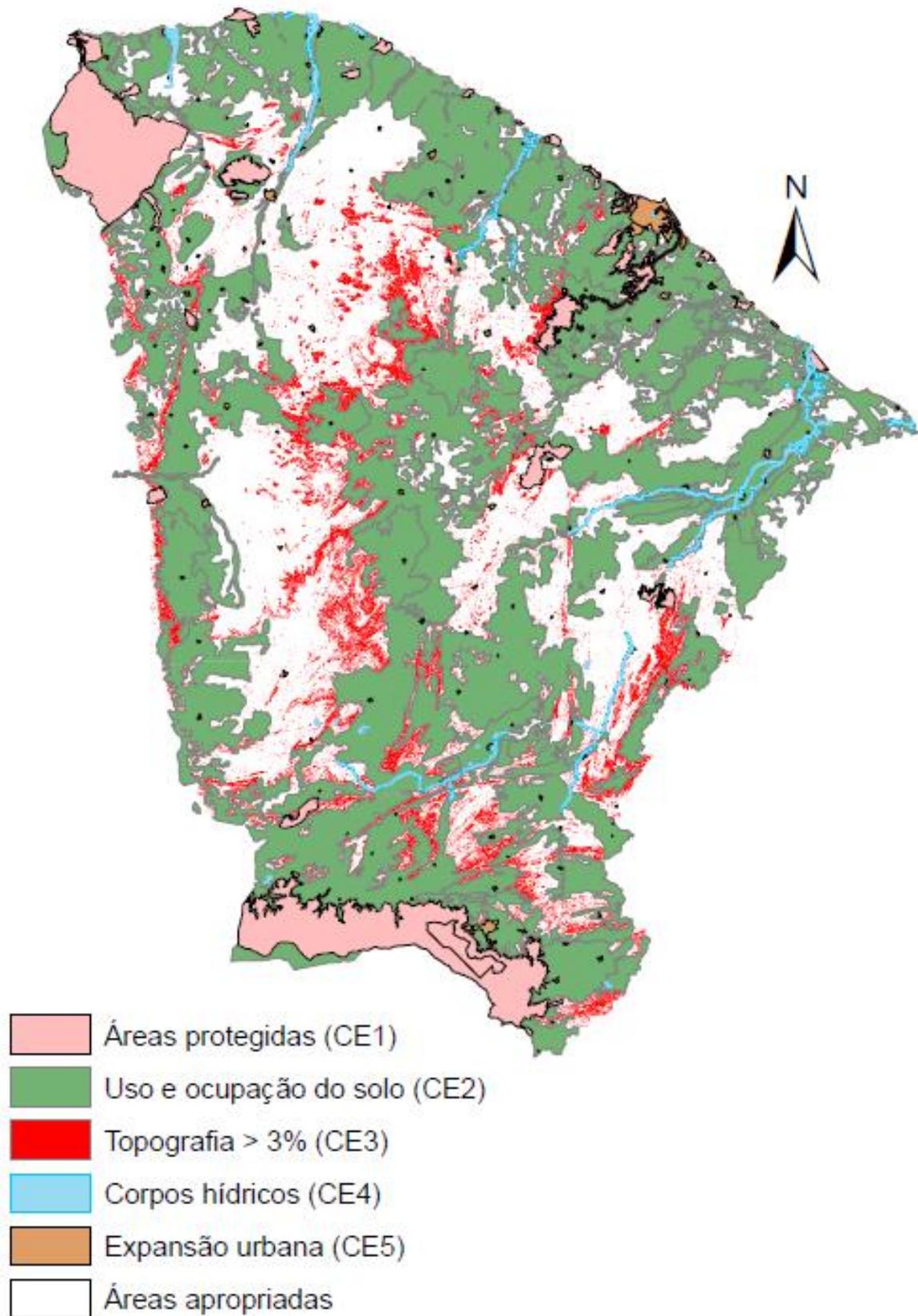


Figura 13 – Áreas adequadas para instalações do tipo PV em grande escala no estado do Ceará.



**Classificação**

- Áreas adequadas
- Áreas inadequadas

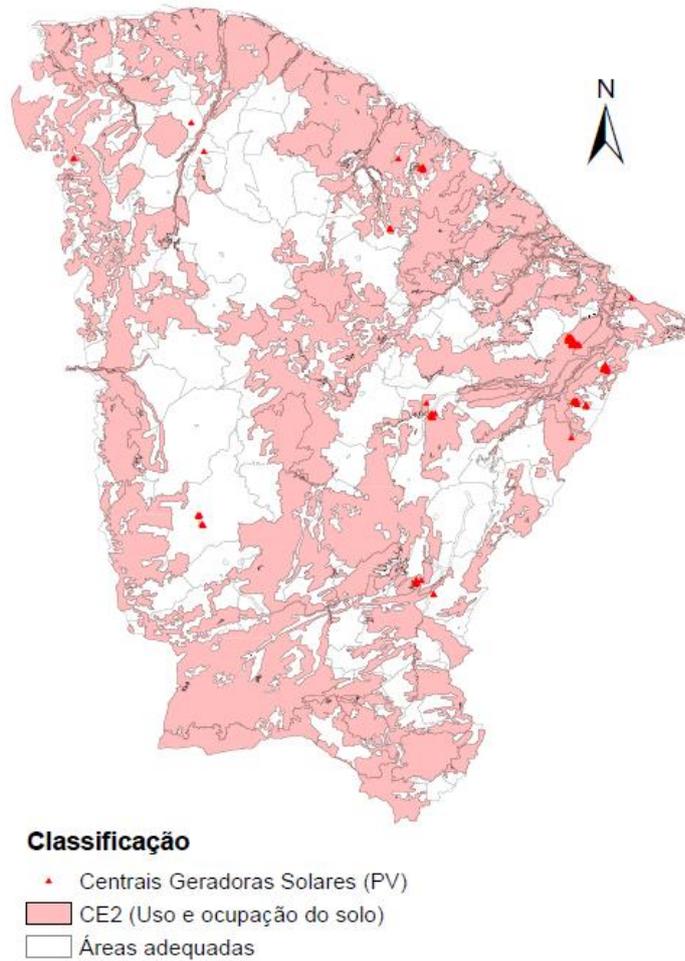
Os dez municípios que mais abrangem áreas adequadas estão concentrados na região do Serão de Inhamuns, Central e região Jaguaribana. Juntos correspondem a mais de um terço de toda área disponível no Ceará (Tabela 02).

**Tabela 03 – Dez maiores disponibilidades de áreas adequadas para exploração PV no Ceará.**

<b>Posição</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Município</b>
1	3.783,8	Santa Quitéria
2	3.067,9	Tauá
3	2.995,0	Independência
4	2.111,4	Canindé
5	1.873,6	Sobral
6	1.752,3	Quixeramobim
7	1.670,4	Tamboril
8	1.630,2	Jaguaribe
9	1.319,0	Irauçuba
10	1.273,0	Crateús

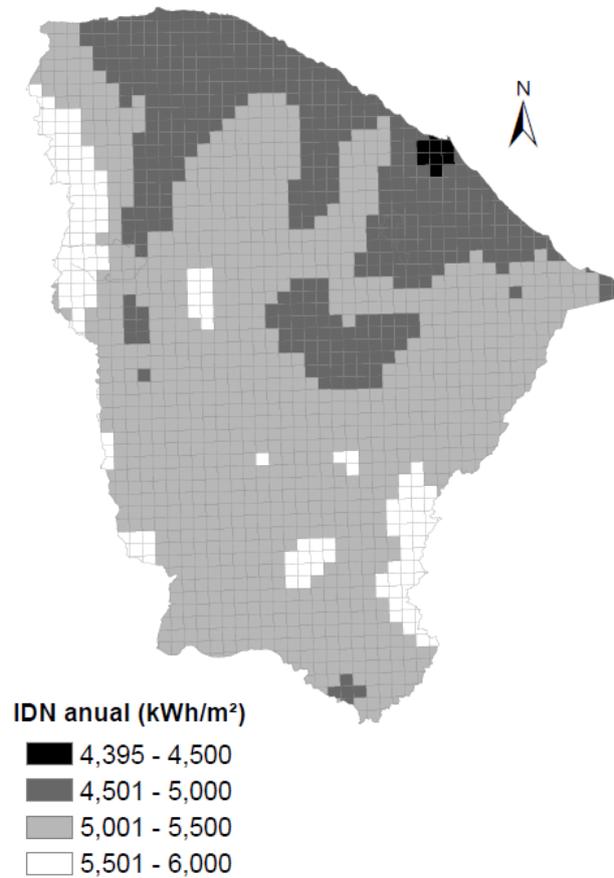
Ao se comparar as áreas adequadas adequadas, de acordo com os critérios indicados na seção de material e métodos, com a efetiva localização das unidades de centrais fotovoltaicas instaladas no estado (shape disponível pelo SIGEL/ANEEL com dados até 2017) verificou-se a presença de 98 unidades PV. Destas, 66% das unidades estão em confronto com a condição de exclusão 2 (uso e ocupação do solo) apontada neste trabalho. Isto no entanto não significa que estejam instaladas em áreas totalmente desfavoráveis, apenas que segundo os objetivos desta pesquisa se encontram em conflito com áreas que potencialmente estão sendo usadas para fins agricultáveis (Figura 14).

Figura 14 – Áreas adequadas à exploração fotovoltaica e centrais PV já instaladas no estado do Ceará.



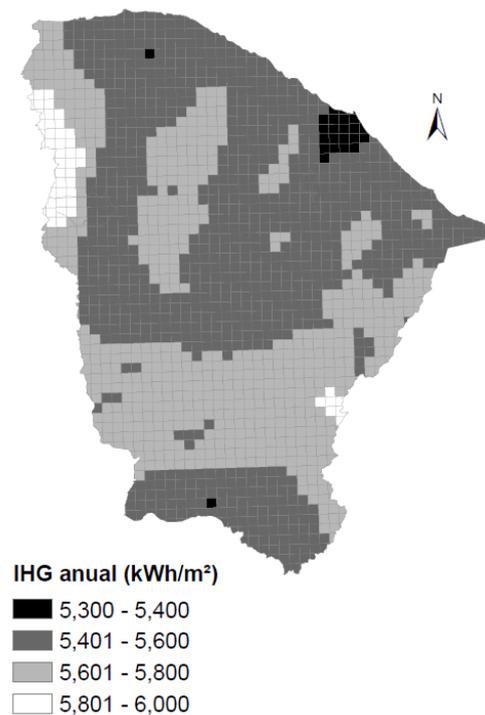
Analisando o critério de recurso solar, o Ceará apresenta em todas suas localidades potencial para exploração de plantas do tipo CSP por apresentar valores de IDN superiores a 1800 kWh/m<sup>2</sup>, com valores mínimos de mais de três vezes ao superior a este. Maiores valores de IDN são encontrados na Chapada da Ibiapaba e do Apodi e em áreas pontuais de grande altitude ao longo do relevo, os quais classificam-se como inadequadas pela topografia desfavorável para exploração solar (Figura 15). De forma geral, bons índices são encontrados no território cearense excluindo-se a região litorânea e áreas de altitude elevada.

Figura 15 – Classes de Irradiação Direta Normal anual no Ceará



No que concerne à radiação do tipo IGH, melhores índices são encontrados na região centro-sul e dos inhamuns. Vale salientar que todos os valores de radiação encontrados são suficientes para viabilizar sua exploração no estado. Embora o foco desta pesquisa seja levantar locais para instalações em grande escala, a mini geração pode ser facilmente desenvolvida em quaisquer localidades (Figura 16).

**Figura 16 – Classes de Irradiação Global Horizontal anual no Ceará**



Quanto aos critérios de classificação, pode-se observar que o estado é bem atendido quantitativamente pela presença de rodovias estaduais e federais (Figura 17a).

Entrave para a infraestrutura energética cearense está a extensão e localização estratégica das linhas de transmissão (SERPA, 2018). Grandes porções do estado estão distantes mais de 40 km das redes (Figura 17b), o que inviabiliza o escoamento de energia caso fossem geradas principalmente em porções do litoral norte e leste e intensamente no vale do Jaguaribe, Sertão dos Inhamuns e de Crateús. Há ainda a expectativa da atração de novos investimentos em infraestrutura energética para 2019, com a expansão da rede de transmissão apenas para região metropolitana e sul e instalação de uma subestação em Jaguaruana (CABRAL, 2018).

A presença de subestações é menos crítica do que a de linhas de transmissão. Apenas pequenas porções isoladas nos Sertões de Canindé, Crateús e Inhamuns (Figura 17c).

Quanto aos centros econômicos de demanda estes estão concentrados principalmente na Região Metropolitana de Fortaleza e sul cearense e ainda Sertão de Ibiapaba e Sobral (Figura 17d).

Na mesma condição estão as cidades entre 100 e 250 mil e habitantes e também maiores que esse valor. Estas, no entanto dispõem de condições de infraestrutura energética de forma a atender suas demandas (Figura 17e e 17f).

Figura 17 – Critérios de classificação para identificação de aptidão de áreas à instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica no Ceará

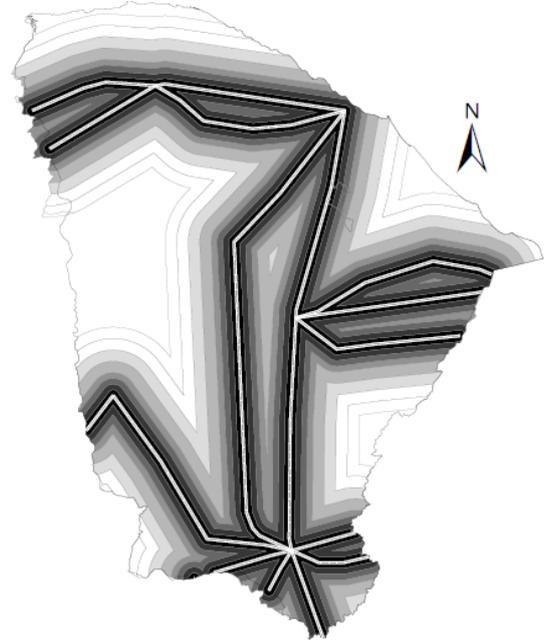
a. Rodovias



Proximidade a rodovias (km)

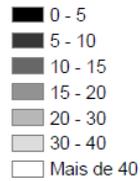


b. Linhas de transmissão

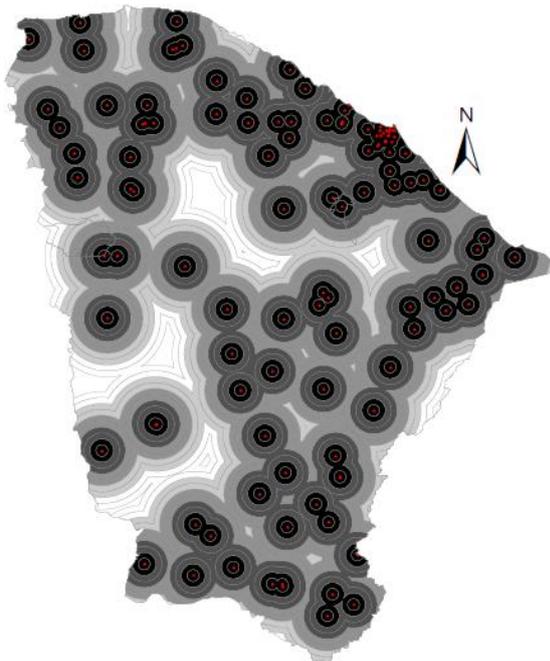


Distância a linhas de transmissão (Km)

Linhas de Transmissão



c. Subestações

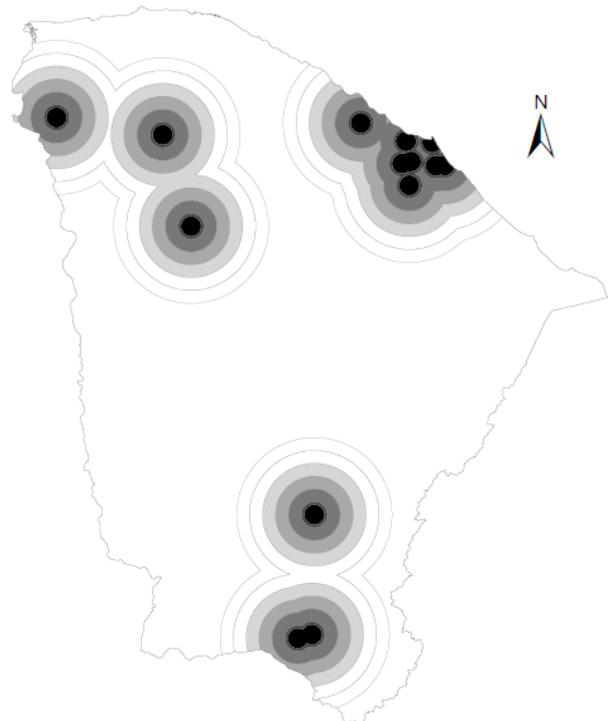


Distância a subestações (Km)

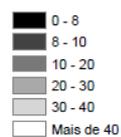
Subestações



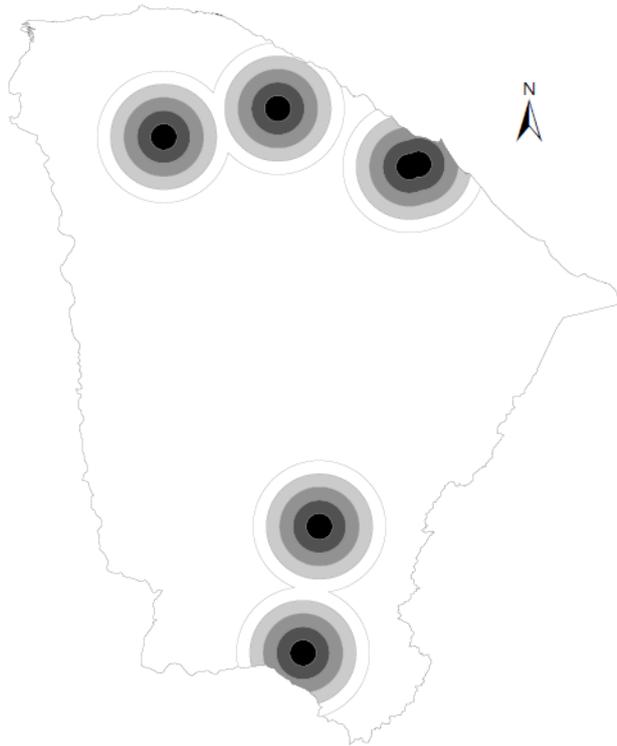
d. Centros econômicos de demanda



Distância a centros econômicos de demanda (Km)



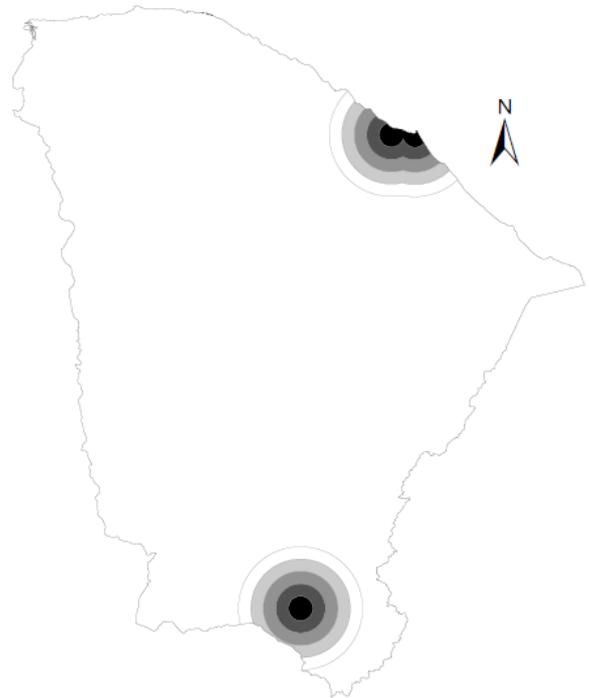
e. Cidades com 100 a 250 mil habitantes



Distância a cidades com 100 a 250 mil habitantes (Km)



f. Cidades com mais de 250 mil habitantes

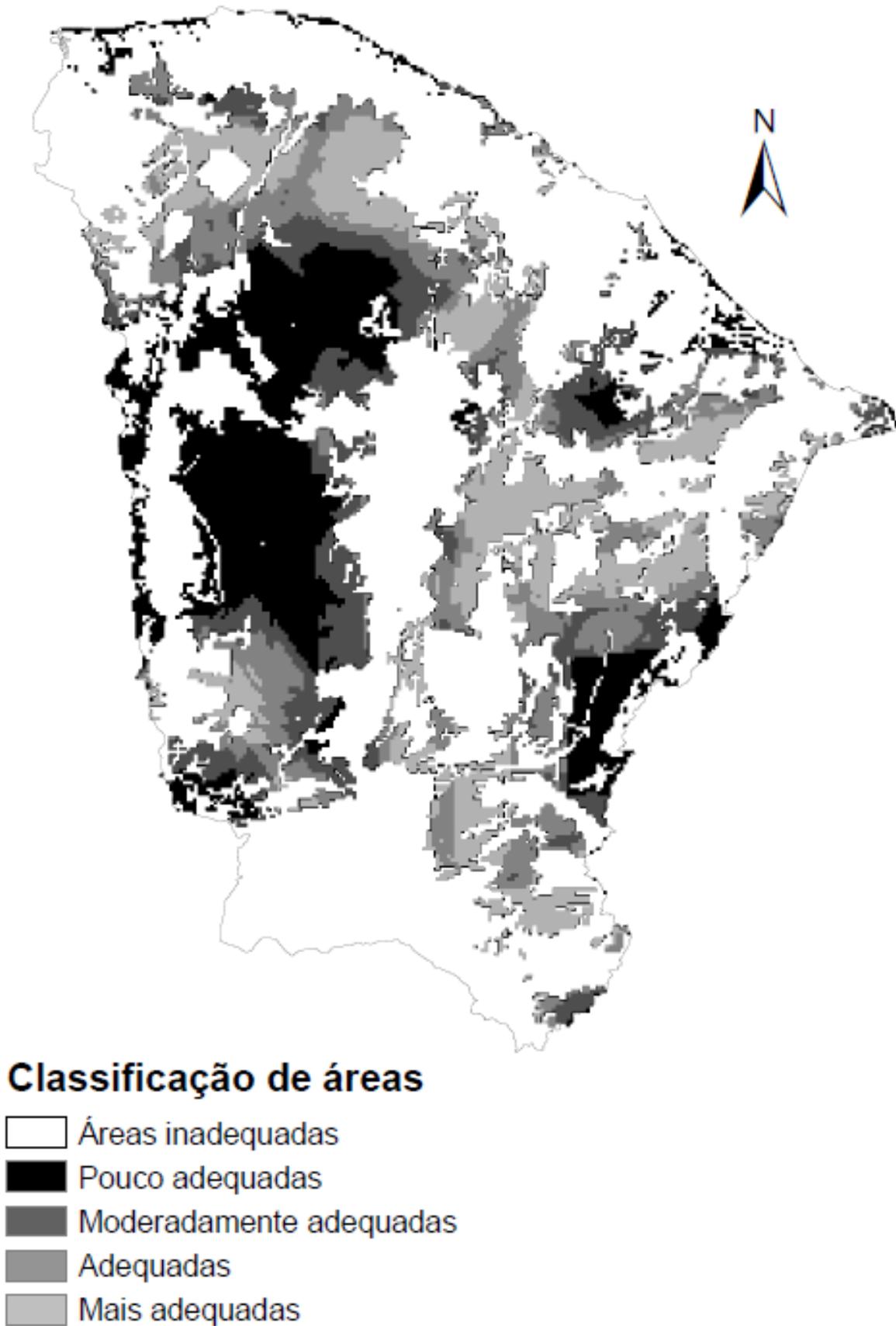


Distância a cidades com mais de 250 mil habitantes (Km)



As áreas adequadas foram classificadas conforme a influência das variáveis de classificação: Mais adequadas, adequadas, moderadamente adequadas e pouco adequadas. Para instalações fotovoltaicas, foram designados 17.391 km<sup>2</sup> como mais adequado, 13.664,31 km<sup>2</sup> foram designados como adequados, 6.211,05 km<sup>2</sup> foram designados como moderadamente adequados e 24.844,2 km<sup>2</sup> foram designados como pouco adequados (Figura 18). O grande entrave, no entanto, para a classe pouco adequadas ser majoritária foi a condição das linhas de transmissão existentes. Os sertões de Inhamuns e Crateús apresentam boas condições de potencial, mas sua viabilidade tem sido reduzida drasticamente pela infraestrutura energética existente no estado.

Figura 18 – Classificação de áreas adequadas à instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica no Ceará



## 6. CONCLUSÕES

Identificar a melhor localização para a instalação de uma usina de energia solar é estritamente importante para avaliar a sustentabilidade de áreas e viabilizar elevados investimentos iniciais. Vários critérios técnico-econômicos foram usados para identificar os locais mais adequados para instalações de energia solar no Ceará. Uma combinação de análise SIG e técnica MCDCM foi aplicada para identificar a energia solar em grande escala em pontos ótimos no estado.

A seleção cuidadosa dos critérios de decisão, exclusão e classificação refletem bem o contexto local (por exemplo, para tomadas de decisão de órgãos públicos e privados) foram a chave para obter resultados confiáveis.

A pesquisa identificou cinco critérios de exclusão (áreas protegidas, uso e ocupação do solo, topografia, recursos hídricos e expansão urbana) para localizar áreas inadequadas. Dois critérios de decisão foram considerados. Sob o critério de decisão de acessibilidade, foram identificados três critérios de classificação (ou seja, proximidade a estradas, linhas de transmissão e subestações), enquanto sob o grupo de decisão de demanda foram identificados três critérios de classificação (ou seja, proximidade com cidades com mais de 250 mil habitantes, proximidade com cidades entre 100 e 250 mil habitantes, e proximidade com centros econômicos de demanda). O processo hierárquico analítico foi usado para determinar os pesos relativos dos critérios de decisão e pesos finais dos critérios de classificação.

O estado do Ceará possui níveis de radiação ideais para exploração CSP e PV, portanto não se configurando como critério de exclusão para locais com baixa radiação. Por possuir um território quase que totalmente plano ou levemente inclinado, não foram identificadas grandes divergências entre áreas adequadas para instalações CSP das adequadas para instalações PV. No entanto, a energia solar concentrada é inviável diante de ser utilizadora de vazões consideráveis de água, uma vez que o estado apresenta déficit hídrico de água e possui conflitos de uso pela mesma. Assim, foi identificada uma área adequada de 62.110,5 km<sup>2</sup> para exploração fotovoltaica.

Esta foi classificada de acordo com critérios que viabilizassem locais ainda mais específicos segundo critérios econômicos. Para instalações fotovoltaicas, foram designados 17.391 km<sup>2</sup> como mais adequado, 13.664,31 km<sup>2</sup> foram designados como adequados, 6.211,05 km<sup>2</sup> foram designados como moderadamente adequados e 24.844,2 km<sup>2</sup> foram designados como pouco adequados.

Há locais com enorme potencial de exploração (Sertão de Crateús e Inhamuns) mas que carecem de infraestrutura energética (principalmente subestações e linhas de transmissão) para viabilizar de forma comercial a exploração da radiação solar em grande escala.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, Emanuel Lindemberg Silva et al. **PERFIL GEOSSOCIOECONÔMICO: Um olhar para as Macrorregiões de Planejamento do Estado do Ceará**. Fortaleza: Ipece, 2014.

ALY, Ahmed; JENSEN, Steen Solvang; PEDERSEN, Anders Branth. Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 113, p.159-175, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.077>.

ANEEL. **Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL)**. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>>. Acesso em: 14 jan. 2018.

ANGELIS-DIMAKIS, Athanasios et al. Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 15, n. 2, p.1182-1200, fev. 2011.

ANWARZAI, Mohammad Abed; NAGASAKA, Ken. Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 71, p.150-160, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.048>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899**: Energia solar fotovoltaica - Terminologia. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: ABNT, 2013.

BERMANN, Célio. Crise ambiental e as energias renováveis. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 60, n. 3, p.20-29, set. 2008. Disponível em: <[http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=s0009-67252008000300010&script=sci\\_arttext](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=s0009-67252008000300010&script=sci_arttext)>. Acesso em: 20 maio 2017.

BRANDÃO, Ricardo De Lima. (Brasil) (Org.). **Geodiversidade do Estado do Ceará**: Programa geologia Brasil levantamento da geodiversidade. Fortaleza: CRPM, 2014. 214 p.

BREWER, Justin et al. Using GIS analytics and social preference data to evaluate utility-scale solar power site suitability. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 81, p.825-836, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.017>

BYRNE, John et al. Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A GIS- and lifecycle cost-based assessment of Western China's options. **Energy Policy**, Elsevier, n. 35, p.4391-4401, abr. 2007.

CABRAL, Bruno. CE: linhas de transmissão elevarão atratividade. **Diário do Nordeste**. Fortaleza, p. 00-01. 04 fev. 2018. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/ce-linhas-de-transmissao-elevarao-atratividade-1.1877025>>. Acesso em: 04 fev. 2018.

CARRIÓN, J. Arán et al. Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 12, n. 9, p.2358-2380, dez. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.011>.

CASTILLO, Carolina Perpiña; SILVA, Filipe Batista e; LAVALLE, Carlo. An assessment of the regional potential for solar power generation in EU-28. **Energy Policy**, [s.l.], v. 88, p.86-99, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.004>.

CEARÁ. DEPARTAMENTO ESTADUAL DE RODOVIAS. . **DER divulga o Mapa Rodoviário 2017**. Disponível em: <<http://portal.der.ce.gov.br/index.php/noticias/43784>>. Acesso em: 27 nov. 2017

CHARABI, Yassine; GASTLI, Adel. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 36, n. 9, p.2554-2561, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.037>.

COHEN, Gilbert; SKOWRONSKI, Mark; CABLE, Robert. **SOLAR THERMAL PARABOLIC TROUGH ELECTRIC POWER PLANTS FOR ELECTRIC UTILITIES IN CALIFORNIA**. Los Angeles: Solargenix Energy, 2005

DAWSON, Lucas; SCHLYTER, Peter. Less is more: Strategic scale site suitability for concentrated solar thermal power in Western Australia. **Energy Policy**, [s.l.], v. 47, p.91-101, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.025>.

DINCER, Ibrahim. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 4, n. 2, p.157-175, jun. 2000.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese: ano base 2016**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA EMBRAPA. **Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1979.

FU, Pinde; RICH, Paul. **The Solar Analyst 1.0: User Manual**. Kansas: Helios Environmental Modeling Institute, Llc, 2000.

FUNCEME. **Atlas Solarimétrico do Ceará 1963 - 2008**. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 2010.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, v. 72, p.6-15, fev. 2007.

HERMAN, S., Miketa, A., Fichaux, N., 2014. Estimating the Renewable Energy Potential in Africa. **IRENA-KTH Working Paper**, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.

HOWELLS, Mark; ROEHRL, R. Alexander. **Perspectives on Sustainable Energy for the 21st Century. Sustainable Development in the 21st Century (SD21) project**. New York:

United Nations Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development. 2012. 58 p.

IBGE. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

IBGE. **Projeção da população do Brasil por sexo e idade para o período 2000/2060**. Brasília: Ibge, 2013

IBGE. **Logística de energia: 2015**: Redes e fluxos do território. Rio de Janeiro: Ibge, 2016.

IPECE. **Anuário estatístico do Ceará (2016)**. Disponível em: <[http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/anuario/anuario2016/aspectosEconomicos/industria/dados\\_gerais.htm](http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/anuario/anuario2016/aspectosEconomicos/industria/dados_gerais.htm)>. Acesso em: 14 jan. 2018.

IRENA, International Renewable Energy Agency. **RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES: Solar Photovoltaics**. Abu Dhabi: IRENA, 2012.

IRENA, International Renewable Energy Agency. **RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES: Concentrating solar power**. Abu Dhabi: IRENA, 2013

IRENA (2016b). **Renewable Capacity Statistics 2016**, Abu Dhabi, <[www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=1719](http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=1719)>. Acesso em: 28 maio de 2017.

IRENA (2016a). **Renewable energy statistics 2016**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2016.

IRENA. **REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2017.

JAHANGIRI, Mehdi et al. Finding the best locations for establishment of solar-wind power stations in Middle-East using GIS: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 66, p.38-52, dez. 2016. Elsevier BV.

JANKE, Jason R.. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 35, p.2228-2234, abr. 2010.

JUCÁ, Sandro César Silveira; CARVALHO, Paulo César Marques de; AGUIAR JÚNIOR, José Sérgio de. A relevância dos sistemas de informação geográfica no desenvolvimento das energias renováveis. **Ciências & Cognição**, Rio de Janeiro, v. 09, p.131-136, nov. 2006.

LATINOPOULOS, D.; KECHAGIA, K.. A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 78, p.550-560, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.041>.

LEBEÑA, Eduardo Perez; COSTA, Jorge Cruz. **Conversão térmica da energia solar**. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Energia Solar: Spes, 1996.

LOHMANN, S. et al. Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data. **Solar Energy**. Elsevier, v. 80, n. 11, p.1390-1401, maio 2006.

MACKNICK, Jordan et al. **A Review of Operational Water Consumption and Withdrawal Factors for Electricity Generating Technologies**. Colorado: National Renewable Energy Laboratory (nrel), 2011.

MAHTTA, Richa; JOSHI, P.k.; JINDAL, Alok Kumar. Solar power potential mapping in India using remote sensing inputs and environmental parameters. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 71, p.255-262, jun. 2014.

MARDANI, Abbas et al. Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. **Economic Research-ekonomiska Istraživanja**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.516-571, jan. 2015. Informa UK Limited.

MMA. **Painel de indicadores ambientais**. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/pnia/Arquivos/Temas/Atmosfera\\_e\\_Mudancas\\_Climaticas\\_AMC/1\\_Mudancas\\_Climaticas/AMC\\_1\\_1/Metadado\\_AMC\\_1\\_1.pdf](http://www.mma.gov.br/pnia/Arquivos/Temas/Atmosfera_e_Mudancas_Climaticas_AMC/1_Mudancas_Climaticas/AMC_1_1/Metadado_AMC_1_1.pdf)>. Acesso em: 19 jul. 2017.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Sistema Nacional de Unidades Conservação - SNUC**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/sistema-nacional-de-ucs-snuc>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

MORAIS, J.O.; Freire, G.S.S.; Pinheiro, L.S.; Souza, M.J.N.; Carvalho, A.M.; Pessoa, P.R.S.; Oliveira, S.H.M.Ceará. In: Muehe, D. (Org.). **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. Brasília: MMA, 2006. 476p. (ISBN 85-7738-028-9).

NUNES, G.S.S., ANDRÉ, R.G.B., VIANELLO, R.L., MARQUES, V.S. Estudo da distribuição de radiação solar incidente sobre o Brasil. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 4. p. 5-30, 1979.

NOOROLLAHI, Ehsan et al. Land Suitability Analysis for Solar Farms Exploitation Using GIS and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)—A Case Study of Iran. **Energies**, [s.l.], v. 9, n. 8, p.643-667, 19 ago. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en9080643>

PANWAR, N.I.; KAUSHIK, S.c.; KOTHARI, Surendra. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 15, n. 3, p.1513-1524, abr. 2011

PARIDA, Bhubaneswari; INIYAN, S.; GOIC, Ranko. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 3, p.1625-1636, abr. 2011. Elsevier BV.

PEREIRA, Amaro Olimpio et al. Energy in Brazil: Toward sustainable development?. **Energy Policy**, [s.l.], v. 36, n. 1, p.73-83, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.022>.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RÜTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: INPE, 2017. v. 2. 88p.

PEREIRA, Marcio Giannini et al. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 16, n. 6, p.3786-3802, ago. 2012.

PEREIRA JUNIOR, Amaro Olimpio et al. Perspectives for the expansion of new renewable energy sources in Brazil. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 23, p.49-59, jul. 2013.

PICANÇO, Jurandir; ROLIM, Joaquim. **Panorama Atual das Energias Renováveis**. Fortaleza: FIEC, 2016.

PINHO, João Tavares et al. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio (Org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel/creseb, 2014.

REN21. **Renewables 2015 Global Status Report**. Paris: Ren21 Secretariat, 2015.

REN21. **Energias Renováveis 2016: Relatório da situação mundial (Português)** . Paris: Ren21 Secretariat, 2016.

SAATY, Thomas L. The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill; 1980.

SAATY, Thomas L.. Fundamentals of the analytic network process — multiple networks with benefits, costs, opportunities and risks. **Journal Of Systems Science And Systems Engineering**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.348-379, set. 2004. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11518-006-0171-1>.

SACRAMENTO, Elissandro Monteiro do et al. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. **Iet Renewable Power Generation**, [s.l.], v. 9, n. 8, p.1019-1024, 1 nov. 2015. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0120>.

SANTOS, Nicorray de Queiroz. **Ceará e a tendência de uma matriz energética com geração predominantemente eólico-elétrica**. 2015. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015

SCHAEFFER, Roberto et al. **Mudanças climáticas e segurança energética no brasil**. Rio de Janeiro: Ufrj, 2008.

SELIN, Noelle Eckley. **Renewable energy**. [s.l]: Encyclopædia Britannica, Inc., 2017.

SERPA, Egídio. **Energia: no Ceará faltam Linhas de Transmissão**. Disponível em: <<http://blogs.diariodonordeste.com.br/egidio/energia/energia-no-ceara-faltam-linhas-de-transmissao/>>. Acesso em: 04 fev. 2018

SOARES, GUILHERME FLEURY W.; VIEIRA, LEONARDO DOS SANTOS R.; GALDINO, MARCO ANTÔNIO. **Comparação de Custos entre Sistemas Fotovoltaicos**

**Individuais e Minicentrais Fotovoltaicas para Eletrificação Rural.** Relatório Técnico Cepel DTE – 745/2010, Março de 2010

TAHRI, Meryem; HAKDAOUI, Mustapha; MAANAN, Mohamed. The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 51, p.1354-1362, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.054>

TIBA, C. et al. A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil. **Renewable Energy**, Elsevier, n. 35, p.2921-2932, jun. 2010.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (Org.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (epe), 2016.

TRIEB, Franz et al.. **Characterisation of Solar Electricity Import Corridors from MENA to Europe: Potential, Infrastructure and Cost.** Stuttgart: German Aerospace Center, 2009.

TURCHI, C.s.; WAGNER, M.j.; KUTSCHER, C.f.. **Water Use in Parabolic Trough Power Plants: Summary Results from WorleyParsons' Analyses.** Colorado: National Renewable Energy Laboratory (nrel), 2010.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects: The 2015 Revision.** New York: Department Of Economic And Social Affairs, Population Division, 2015. 59 p.

UYAN, Mevlut. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 28, p.11-17, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042>

VAF AEIPOUR, Majid et al. Assessment of regions priority for implementation of solar projects in Iran: New application of a hybrid multi-criteria decision making approach. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 86, p.653-663, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.083>

VRIES, Bert J.m. de; VAN VUUREN, Detlef P.; HOOGWJK, Monique M.. Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level. **Energy Policy**, [s.l.], v. 35, n. 4, p.2590-2610, abr. 2007. Elsevier BV

WONG, Man Sing et al. Estimation of Hong Kong's solar energy potential using GIS and remote sensing technologies. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 99, p.325-335, jul. 2016.

YUE, Cheng-dar; WANG, Shi-sian. GIS-based evaluation of multifarious local renewable energy sources: a case study of the Chigu area of southwestern Taiwan. **Energy Policy**, Elsevier, v. 34, p.730-742, ago. 2006

ZAIDI, Faisal K. et al. Identification of potential artificial groundwater recharge zones in Northwestern Saudi Arabia using GIS and Boolean logic. **Journal Of African Earth Sciences**, Elsevier, v. 111, p.156-169, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.07.008>.

ZHANG, H.I. et al. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 22, p.466-481, jun. 2013. Elsevier BV