

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PAULO ANTÔNIO XAVIER FURTADO

**SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA INTEGRADO A MÉTODOS
MULTICRITÉRIOS DE TOMADA DE DECISÃO PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS
PARA USINAS FOTOVOLTAICAS**

TESE

PONTA GROSSA

2021

PAULO ANTÔNIO XAVIER FURTADO

**SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA INTEGRADO A MÉTODOS
MULTICRITÉRIOS DE TOMADA DE DECISÃO PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS
PARA USINAS FOTOVOLTAICAS**

**Geographic information system integrated to multi-criteria decision making
methods to prioritize areas for photovoltaic plants**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Vanderley Herrero Sola

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa**



PAULO ANTONIO XAVIER FURTADO

SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA INTEGRADO A MÉTODO MULTICRITÉRIO DE TOMADA DE DECISÃO PARA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS PARA USINAS FOTOVOLTAICAS

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 03 de Fevereiro de 2021

Prof Antonio Vanderley Herrero Sola, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Caroline Maria De Miranda Mota, Doutorado - Universidade Federal de Pernambuco (Ufpe)

Prof Flavio Trojan, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Joao Carlos Colmenero, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Silvana Philippi Camboim, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 03/02/2021.

*Dedico este trabalho ao meu pai, Danilo Furtado
(in memoriam), à minha mãe Eremy Lourdes
Xavier Furtado (in memoriam), à minha esposa
Dirce Maria Golin e às minhas filhas Letícia Golin
Furtado e Larissa Golin Furtado, que tanto me
compreenderam nesta jornada.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Vanderley Herrero Sola, que nas horas cruciais soube iluminar o caminho a ser seguido de forma segura.

A coordenação, pelo incansável trabalho junto à organização, aos professores e aos colegas para alcançarmos o sucesso nesta jornada.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que permite a um grupo de profissionais com fortes características de pesquisadores, a acreditarem na educação e pesquisa como forma de libertação de uma nação.

RESUMO

Esta tese tem como objetivo resolver as problemáticas de seleção e ordenação de sites para instalação de usinas solares fotovoltaicas, propondo um modelo de decisão aplicando álgebra de mapas *fuzzy* de critérios geográficos em um sistema de informações geográficas, com pesos calculados pela técnica “ponderação por grau de pertinência máxima de pixels” ao gerar um mapa de índice de adequação de alternativas geográficas máximas para selecionar alternativas adequadas de sites, integrado a métodos multicritérios de tomada de decisão com critérios empresariais para ordenar as alternativas de sites selecionadas. O estado do Paraná foi escolhido, considerando a eficiência energética do projeto, devido às excelentes condições climáticas, geomorfológicas e de logísticas, associado a fatores econômicos e socioambientais heterogêneos, demonstrando como resultado que a região apresenta condições geográficas e empresariais para a instalação de usinas solares fotovoltaicas na maior parte do território. O modelo de decisão proposto mostrou-se adequado para evitar distorções na seleção e ordenação de sites sob o ponto de vista dos *stakeholders*, especialmente de representantes de investidores que participaram das pesquisas de tomadas de decisões. O modelo, também apresenta aplicabilidade a outros projetos similares de seleção e ordenação de sites para instalação de usinas solares fotovoltaicas.

Palavras-chave: SIG-MCDM. COPRAS-F. SWARA-SAW. Localização de centrais fotovoltaicas. Energia renovável.

ABSTRACT

This thesis aims to solve the problems of site selection and ordering for installation of photovoltaic solar plants, proposing a decision model applying algebra of *fuzzy* maps of geographical criteria in a geographic information system, with weights calculated by the technique “*Weighting by Maximum Pertinence Degree of Pixels*” when generating a map of the suitability index of maximum geographical alternatives to select suitable site alternatives, integrated with multi-criteria decision-making methods with business criteria to order the selected site alternatives. The state of Paraná was chosen, considering the energy efficiency of the project, due to the excellent climatic, geomorphological and logistical conditions, associated with heterogeneous economic and socio-environmental factors, demonstrating as a result that the region has geographical and business conditions for the installation of solar plants photovoltaic in most of the territory. The proposed decision model proved to be adequate to avoid distortions in the selection and ordering of sites from the point of view of stakeholders, especially representatives of investors who participated in decision-making research. The model is also applicable to other site selection and ordering similar projects for the installation of photovoltaic solar plants.

Keywords: GIS-MCDM. COPRAS-F. SWARA-SAW. Photovoltaic power station location. Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - SIG.....	23
Figura 2 - SIG-MCDM.....	26
Figura 3 - MCDM.....	27
Figura 4 - SIG-MCDM.....	29
Figura 5 - Técnica WMPDP	34
Figura 6 - Seleção dos métodos MCDM.....	38
Figura 7 - Método MCDM SWARA	41
Figura 8 - Matrix de decisão <i>fuzzy</i>	47
Figura 9 - Matrix de decisão defuzzificada normalizada ponderada.....	47
Figura 10 - Cálculos da significância prioridades e ranking.....	47
Figura 11 - Função de pertinência <i>fuzzy</i> triangular	48
Figura 12 - Mapa do Estado Paraná	53
Figura 13 - Processamentos dos mapas de subcritérios geográficos	57
Figura 14 - Processamentos dos mapas de restrições geográficas	58
Figura 15 - Aspecto	61
Figura 16 - Mapas de índices de adequação de subcritérios geográficos.....	62
Figura 17 - Mapas de índices de adequação de restrições geográficas	64
Figura 18 - Mapa de índice de adequação geográfico	65
Figura 19 - Simulações da álgebra de mapas	66
Figura 20 - Mapa de índice de adequação geográfico máximo.....	67
Figura 21 - Mapa dos municípios dos sites selecionados do Paraná.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pesquisa de Classificação de Importância de Critérios e Subcritérios Empresariais	73
Quadro 2 - Pesquisa de classificações linguísticas de critérios	81
Quadro 3 - Pesquisa de classificações linguísticas de alternativas.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesquisas modelo SIG.....	24
Tabela 2 - Métodos MCDM compensatórios.....	25
Tabela 3 - SIG-MCDM.....	26
Tabela 4 - MCDM.....	28
Tabela 5 - Termos linguísticos.....	49
Tabela 6 - Mapas de critérios e subcritérios geográficos.....	55
Tabela 7 - Mapas de restrições geográficas.....	55
Tabela 8 - Funções de pertinência.....	60
Tabela 9 - Funções <i>crisp</i>	60
Tabela 10 - SIG ranking.....	68
Tabela 11 - Origem dos subcritérios empresariais.....	71
Tabela 12 - Ranking dos critérios.....	74
Tabela 13 - Ranking dos critérios econômicos.....	74
Tabela 14 - Ranking dos subcritérios técnicos.....	74
Tabela 15 - Ranking dos subcritérios sociais.....	74
Tabela 16 - Ranking dos subcritérios ambientais.....	75
Tabela 17 - Importância comparativa entre critérios.....	76
Tabela 18 - Importância comparativa entre subcritérios econômicos.....	76
Tabela 19 - Importância comparativa entre subcritérios técnicos.....	77
Tabela 20 - Importância comparativa entre subcritérios sociais.....	77
Tabela 21 - Importância comparativa entre subcritérios ambientais.....	77
Tabela 22 - Cálculo dos pesos normalizados dos critérios.....	77
Tabela 23 - Cálculo dos pesos normalizados dos subcritérios econômicos.....	78
Tabela 24 - Cálculo dos pesos normalizados dos subcritérios técnicos.....	78
Tabela 25 - Cálculos dos pesos normalizados dos subcritérios sociais.....	78
Tabela 26 - Cálculo dos pesos normalizados dos subcritérios ambientais.....	78
Tabela 27 - Subcritérios empresariais.....	79
Tabela 28 - Matriz de Tomada de Decisão.....	80
Tabela 29 - Resultados da Aplicação do Método SAW.....	80
Tabela 30 - Termos linguísticos para pesquisa de critérios.....	83
Tabela 31 - Matriz linguística de critérios.....	83
Tabela 32 - Pesos dos critérios: fuzzificação defuzzificação e normalização.....	84
Tabela 33 - Termos linguísticos para pesquisa de alternativas.....	85

Tabela 34 - Matriz linguística de alternativas A1 - A2 - A3 - A4	85
Tabela 35 - Matriz linguística de alternativas A5 - A6 - A7 - A8	86
Tabela 36 - Matriz linguística de alternativas A9 - A10	86
Tabela 37 - Ranking COPRAS-F das alternativas.....	86
Tabela 38 - Ranking SIG-MCDM.....	87
Tabela 39 - Método da Borda.....	89
Tabela 40 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A1	112
Tabela 41 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A2	112
Tabela 42 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A3	113
Tabela 43 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A4	113
Tabela 44 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A5	113
Tabela 45 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A6	114
Tabela 46 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A7	114
Tabela 47 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A8	114
Tabela 48 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A9	115
Tabela 49 - Matriz <i>fuzzy</i> da alternativa A10	115
Tabela 50 - Média <i>fuzzy</i> das alternativas A1 -A2 -A3 -A4	115
Tabela 51 - Média <i>fuzzy</i> das alternativas A5 -A6 -A7 -A8	116
Tabela 52 - Média <i>fuzzy</i> das alternativas A9 -A10	116
Tabela 53 - Matriz defuzzificada (COA) das alternativas A1 ... A10	116
Tabela 54 - Matriz defuzzificada normalizada das alternativas A1 ... A10	117
Tabela 55 - Matriz defuzzificada normalizada ponderada das alternativas A1 ... A10	117
Tabela 56 - Ranking COPRAS-F das alternativas.....	117
Tabela 57 - Planilhas de cálculos do método SAW	119
Tabela 58 - Compatibilidade nos julgamentos de decisores (SWARA).....	122

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
COPRAS-F	<i>Complex Proportional Assessment Alternatives Fuzzy</i>
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
OWA	<i>Ordered Weighted Average</i>
PV	<i>Photovoltaic Power</i>
QGIS	<i>Quantum Gis</i>
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>
SIG	<i>Sistema de Informação Geográfica</i>
SWARA	<i>Step-wise Weight Assessment Ratio</i>
WLC	<i>Weighted Linear Combination</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OS ATUAIS MODELOS DE DECISÃO	15
1.2 SÍNTESE DO PROBLEMA E DA SOLUÇÃO.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.3.1 Objetivo Geral.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
1.4 JUSTIFICATIVA.....	19
1.5 ESTRUTURA DA TESE.....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 O SIG.....	22
2.2 O MODELO SIG.....	23
2.3 O MCDM.....	24
2.4 MODELO SIG-MCDM.....	25
2.5 MODELO MCDM.....	27
3 MODELO SIG-MCDM PROPOSTO	29
4 APLICAÇÃO SIG-MCDM	53
4.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	53
4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS <i>STAKEHOLDERS</i>	54
4.3 IDENTIFICAÇÃO E GERAÇÃO DE MAPAS DE SUBCRITÉRIOS E RESTRICÇÕES GEOGRÁFICAS.....	55
4.4 IDENTIFICAÇÃO DE ALTERNATIVAS GEOGRÁFICAS DE SITES	56
4.4.1 Rasterização dos Mapas de Subcritérios e Restrições Geográficas.....	56
4.4.2 Fuzzificação dos Mapas de Subcritérios e Restrições Geográficas.....	60
4.4.3 Álgebra dos Mapas de Índices de Adequação Geográfico	65
4.4.4 Mapa de Índice de Adequação Geográfico Máximo	65
4.5 IDENTIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS EMPRESARIAIS	69
4.6 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO.....	71
4.6.1 Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis - Weighted Sum Method.....	71
4.6.2 <i>Complex Proportional Assessment Fuzzy</i>	81
4.6.3 Análise dos Resultados.....	87
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS MODELOS	90
5.1 BREVE DISCUSSÃO DAS DIFERENÇAS DE MODELOS.....	90
5.2 ANÁLISE E DISCUSSÃO DO MODELO SIG-MCDM PROPOSTO	91

6 CONCLUSÕES.....	93
6.1 CONTRIBUIÇÕES DO MODELO SIG-MCDM PROPOSTO.....	93
6.2 SUGESTÕES DE APERFEIÇOAMENTOS DO MODELO SIG-MCDM	94
REFERÊNCIAS.....	95
APÊNDICE A - PESQUISA DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE CRITÉRIOS E ENTRE SUBCRITÉRIOS EMPRESARIAIS	104
APÊNDICE B - APLICAÇÃO DO MÉTODO MCDM COPRAS-F (ALTERNATIVAS)	111
APÊNDICE C - WEIGHTED SUM METHOD (SAW).....	118
APÊNDICE D - COMPATIBILIDADE DE JULGAMENTO DE DECISORES.....	121

1 INTRODUÇÃO

Além da biomassa a energia renovável compreende outras fontes, como solar, eólica, geotérmica e hidrelétrica (ALMEIDA *et al.*, 2017; WATANABE *et al.* 2020; IEA, 2004). Apesar do crescimento das energias renováveis observado nos últimos anos, prevalece a maior presença de geração de energia não renovável, incluindo térmicas a carvão e a gás com fortes emissões de CO₂ (IEA, 2018). A Agência Internacional de Energia informou que as energias renováveis representam cerca de 24% da geração de eletricidade do mundo, sendo a maior parte de origem hidrelétrica. Eólica, solar, geotérmica, com previsões anuais de crescimento nos investimentos de mais de 30% (WEC, 2013) até 2050.

A pandemia Covid-19 em 2020 causou uma queda no mercado global, incluindo energia renovável. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2020) enfatizou que “as energias renováveis não são imunes à crise da Covid-19, mas são mais resistentes aos impactos do que outros combustíveis”. Segundo o IEA, a demanda por renováveis aumentará após a crise, considerando a competitividade das renováveis, incluindo desenvolvimento econômico, geração de empregos, redução de emissões de gases e fomento à inovação tecnológica.

Entre as fontes de energia renováveis, o mercado global de energia solar fotovoltaica (PV) tem experimentado um crescimento em muitos países (SAHU, 2015), com a capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica aumentando globalmente e mais do que outras tecnologias, até mesmo do que a energia eólica. Atualmente na Europa, a Alemanha, Itália, Reino Unido, França e Espanha possuem a maior capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica, sendo que, a China detém a maior capacidade instalada de energia solar fotovoltaica, seguida dos Estados Unidos, Japão, Alemanha, Itália, Índia e o Reino Unido. Nos últimos anos, a região Ásia-Pacífico, principalmente a China, tem impulsionado o mercado solar global (SCHMELA *et al.*, 2017).

Considerando que a energia solar é um recurso disponível em todo o mundo com investimentos crescentes, porém ainda existem algumas barreiras, como o alto custo para geração de energia solar, as necessidades de melhorias na qualidade da tecnologia solar e mudanças nas políticas para geração de energia solar fotovoltaica em larga escala (KABIR *et al.*, 2018; ALY *et al.*, 2019). Esforços têm diminuído estas

barreiras viabilizando as grandes centrais fotovoltaicas solares por serem mais viáveis em termos de economia de escala do que minicentrais fotovoltaicas (BHATTACHARYYA *et al*, 2019), sendo que, as centrais fotovoltaicas conectadas as redes de energia, contribuem para atenuar as intermitências de geração (KABIR *et al*. 2018), permitem o armazenamento de outras energia, reduzem as perdas na transmissão, melhoram o desempenho e a estabilidade do sistema elétrico (LAI *et al*. 2017).

Os investimentos globais em energia renovável têm ocorrido de forma diferente entre as regiões, com a Ásia, Europa e América do Norte concentrando a maior parte de geração de energia solar fotovoltaica. Regiões como África, América do Sul, Oriente Médio e América Central têm os menores investimentos, mesmo com alto potencial solar (IRENA, 2019), segundo o Global Solar Atlas (2019), o Brasil possui grande potencial para geração de energia fotovoltaica se comparado a outros países com investimentos mais expressivos em energia solar fotovoltaica.

No Brasil, a energia solar fotovoltaica representava 0,1% da matriz elétrica em 2017, esse percentual subiu para 0,5% em 2018 após alguns investimentos no setor. A maior parte da eletricidade gerada no Brasil é de origem hidrelétrica (66,6%), sendo que, a energia solar fotovoltaica gerou 3.461 GWh em 2018, enquanto as usinas hidrelétricas geraram 388.971 GWh no mesmo período (EPE, 2020). O Brasil tem excelentes oportunidades para aumentar a geração de energia solar fotovoltaica, no entanto, políticas para superar barreiras de mercado e investimentos em P&D para produção de painéis fotovoltaicos com o objetivo de reduzir custos estão entre os principais desafios (CARSTENS; CUNHA, 2019).

1.1 OS ATUAIS MODELOS DE DECISÃO

Dentro deste contexto, a avaliação de aspectos geográficos, econômicos, sociais e ambientais têm sido destacados por formuladores de políticas, especialistas e pesquisadores, pois são complexas as tomadas de decisão em um ambiente que envolve riscos e incertezas, assim modelos de decisão que utilizam Tomada de Decisão Multicritério (MCDM) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido propostos na literatura para localização de sites para instalação de usinas fotovoltaicas. O problema de seleção de locais mais adequados para instalação de

usinas fotovoltaicas envolve diversos grupos de *stakeholders* com diferentes cenários de interesses: os investidores públicos e privados, governos em diversas esferas de poder, ambientalistas e comunidades.

Métodos multicritérios de tomada de decisão (MCDM) são aplicados em problemas de planejamento energético (ZERPA; YUSTA, 2015) auxiliando aos diversos grupos de *stakeholders* a atingirem seus objetivos. A vantagem destes modelos é de permitirem as partes interessadas de chegarem a um acordo a partir da avaliação de múltiplos critérios conflitantes pertencentes a múltiplas dimensões.

Conforme mencionado, outra ferramenta muito aplicada em tomadas de decisão em energias renováveis envolvendo planejamento territorial da infraestrutura são os sistemas de informações geográficas (SIG), que permitem a criação e manipulação de uma extensa base de dados cartográfica com links aos respectivos mapas, sendo sistemas que funcionam com bases de dados de informações geográficas.

De acordo Uyan (2013), também é muito difundida a aplicação da combinação de métodos SIG-MCDM, a partir de uma investigação detalhada da natureza do problema, permitindo a complementariedade entre SIG e MCDM através de uma análise multicritério espacial com base no mapeamento de variáveis físicas geográficas por planos de informações integrado com pontos de vistas de especialistas, às vezes contraditórios, na exploração e solução de problemas de planejamento da localização de plantas de energias renováveis.

Os atuais modelos SIG-MCDM utilizados como solução para o problema de localização de sites de energia fotovoltaica aplicam a álgebra de mapas de subcritérios geográficos fuzzificados com soma ponderada por técnicas MCDM, primordialmente pelos métodos *Ordered Weighted Average (OWA)* e *Weighted Linear Combination (WLC)* e eliminação booleana de restrições geográficas *crisp*, visando “identificar” e ao mesmo tempo “ordenar” alternativas adequadas de sites para instalação de usinas solares fotovoltaicas.

1.2 SÍNTESE DO PROBLEMA E DA SOLUÇÃO

Verifica-se em diversos artigos da literatura com foco em planejamento energético de energias renováveis, a aplicação atual de métodos SIG e SIG-MCDM

com subcritérios geográficos para seleção e ordenação de alternativas de sites para localização de plantas fotovoltaicas sem nenhuma tratativa aplicando subcritérios empresariais.

Aprofundando nesta análise e discussão em relação aos modelos atuais chama atenção:

- As avaliações de Tomoski *et al.* (2017) mostrando a insuficiência dos critérios geográficos para localização de usinas fotovoltaicas, ao demonstrarem que o retorno financeiro está mais relacionado ao modelo tarifário e ao tempo de uso do que a irradiação solar em centrais fotovoltaicas nos Estados Unidos;
- As alterações introduzidas por Mourmouris e Potolias (2013), Vafaeipour *et al.* (2014) e Zerpa e Yusta (2015), os quais com o objetivo de aperfeiçoar os atuais modelos de decisão, iniciaram um processo de inserção de critérios empresariais conjuntamente com critérios geográficos.

Conclui-se que mudanças são necessárias para o aperfeiçoamento dos atuais modelos de decisão, especificamente SIG-MCDM, que levam em consideração apenas os subcritérios geográficos. A solução de modelo de decisão proposta é a aplicação de métodos MCDM com subcritérios empresariais para ordenar as alternativas de sites selecionadas através do SIG com subcritérios geográficos, permitindo o uso da linguagem empresarial cotidiana dos investidores para escolha entre os sites de melhores características geográficas para instalação de plantas fotovoltaicas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Apresentar um modelo de decisão multicritério espacial SIG-MCDM aplicando critérios geográficos de clima, geomorfologia, uso da terra e logística em um sistema de informações geográficas ao selecionar sites potenciais para instalação de usinas solares fotovoltaicas e critérios empresariais sustentáveis

econômicos, socioambientais e técnicos com métodos multicritérios de tomada de decisão ao ordenar os sites potenciais selecionados com foco em investidores, garantindo atratividade ao compensar riscos, especialmente os riscos econômicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar a região de interesse, suas características geoclimáticas, geomorfológicas, econômicas e socioambientais, atento ao clima ensolarado e ameno, áreas de planícies, disponibilidade de estradas rurais pavimentadas com redes de energia de média tensão e demanda de energia com base na população;
- Identificar diferentes *stakeholders* interessados em energias renováveis, seus interesses, visões técnico-econômicas e socioambientais, especialmente os decisores de empresas do setor de energia.
- Identificar subcritérios e restrições geográficas a partir da literatura com disponibilidade de mapas em bases de dados de acesso público, se possível, com a participação dos *stakeholders* interessados nas tomadas de decisão para instalação de plantas fotovoltaicas;
- Selecionar as melhores alternativas geográficas de sites para instalação de centrais fotovoltaicas em um sistema de informações geográficas através dos graus de pertinência ou índices de adequação, obtidos através de álgebra de mapas *fuzzy* de subcritérios geográficos com eliminação de restrições geográficas *crisp*;
- Identificar subcritérios empresariais a partir da literatura, com disponibilidade de informações em banco de dados de acesso público e de uso empresarial cotidiano no setor de energia, selecionados com a participação de *stakeholders* interessados nas tomadas de decisão para instalação de plantas fotovoltaicas;
- Aplicar sistema de informações geográficas com critérios geográficos para selecionar, e métodos multicritérios de tomada de decisão com critérios empresariais para ordenar sites para instalação de usinas solares fotovoltaicas.

1.4 JUSTIFICATIVA

Para justificar a proposta de aperfeiçoamento dos atuais modelos de decisão multicritério espacial SIG-MCDM como solução para o problema de seleção e ordenação de sites para instalações de usinas solares fotovoltaicas, deve-se compreender a raiz do problema de decisão, que envolve basicamente duas dimensões:

- A primeira dimensão do problema de decisão é espacial, que está relacionada à seleção de áreas adequadas para a instalação de usinas solares fotovoltaicas. Nesta dimensão dois aspectos devem ser considerados:
 - A tecnologia SIG, uma excelente ferramenta para mapear áreas potenciais para instalação de usinas, porém requer tempo e conhecimento técnico conceitual para definir e aplicar subcritérios e restrições geográficas espaciais que os investidores podem não ter, implicando na necessidade de outros atores.
 - A questão não compensatória de critérios geográficos ao serem submetidos nos atuais modelos de decisão a métodos MCDM compensatórios na álgebra de mapas de subcritérios geográficos nos SIG.

- A segunda dimensão do problema de decisão envolve os interesses dos *stakeholders*, onde cada um utiliza uma estratégia própria de decisão quando se defronta com um problema de decisão, a qual deve ser respeitada. Além disso, os investidores, públicos ou privados, são essenciais para alavancar as energias renováveis; portanto, um modelo de decisão considerando o investidor como tomador de decisões é decisivo para ampliar os investimentos nesta área.

Para resolver a raiz ou dimensões do problema de decisão, propõe-se como solução um modelo SIG-MCDM aplicando álgebra de mapas *fuzzy* de subcritérios

geográficos de clima, geomorfologia e logística com eliminação de áreas restrições geográficas *crisp* de uso da terra no ambiente SIG para selecionar sites potenciais, com ordenação dos sites selecionados por meio de uma abordagem multicritério, considerando critérios empresariais técnicos-econômicos e socioambientais, de uso cotidiano de investidores e de outros *stakeholders*.

Com a aplicação de critérios geográficos e empresariais para resolver o problema de localização de sites para instalação de usinas solares fotovoltaicas:

- Contribui-se com a melhoria dos atuais modelos SIG-MCDM que são excelentes para selecionar as melhores áreas com base em subcritérios e restrições geográficas, mas que podem induzir a equívocos do ponto de vista empresarial ao selecionarem áreas antieconômicas, ou não recomendadas com relação a aspectos socioambientais;
- Expandem-se os critérios para a tomada de decisão, balanceando os interesses dos diversos *stakeholders* e atendendo a criação de cenários sustentáveis de interesses destes grupos de *stakeholders* ao participarem da tomada de decisão de investimentos públicos ou privados no setor de energia, onde:
 - Grupos econômicos de *stakeholders* estão interessados nas melhores condições geoclimáticas, visando gerar cenários de maior eficiência energética com maior produtividade, menores custos de investimentos e de compensações socioambientais;
 - Grupos de ambientalistas de *stakeholders* estão interessados no uso de infraestrutura existente afastada de áreas de proteção e próximas as cidades, visando gerar um cenário de menor degradação ambiental com eliminação de obras;
 - Grupos sociais de *stakeholders* estão interessados em um maior potencial de geração em terras rurais, preferencialmente não agricultáveis, visando gerar um cenário de aumento de renda local através de impostos.

Com relação a escolha do estado do Paraná para a pesquisa, considerou-se que uma maior eficiência energética de plantas fotovoltaicas está diretamente relacionada com a alta irradiação com temperaturas mais amenas e a baixa declividade do solo, aspectos presentes em boa parte do estado.

Levou-se também em conta como fatores de interesses de *stakeholders*, especialmente os investidores, a heterogeneidade econômica e socioambiental entre as diversas mesorregiões do estado do Paraná e a existência de demanda energética distribuída em função da distribuição populacional em pequenas cidades assistidas por estradas pavimentadas com a mais extensa rede brasileira de distribuição de energia em média tensão de 34,5 kV, perfil excepcional para mini geração fotovoltaica distribuída, com valores de investimentos acessíveis a cooperativas agroindustriais, presentes na grande maioria dos municípios do interior paranaense.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada nos seguintes cinco capítulos:

- Capítulo 1: Introdução - apresenta os objetivos e as justificativas desta tese;
- Capítulo 2: Fundamentações teóricas - apresenta as teorias e conceitos referentes à modelos SIG, MCDM e SIG-MCDM;
- Capítulo 3: Modelo SIG-MCDM proposto - apresenta o novo modelo SIG-MCDM para resolver o problema de localização de usinas fotovoltaicas em vastas e heterogêneas extensões territoriais;
- Capítulo 4: Aplicação SIG-MCDM - apresenta a aplicação real do modelo SIG-MCDM na localização de sites para usinas fotovoltaicas no Estado do Paraná;
- Capítulo 5: Análise e Discussão dos Modelos - apresenta uma breve discussão comparativa dos modelos;
- Capítulo 6: Conclusões - apresenta as principais contribuições da presente tese e sugestões de futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Observa-se na literatura que os pesquisadores da área de planejamento energético têm aplicado os seguintes modelos de decisão:

- SIG ou SIG-MCDM, com critérios geográficos em única fase, para seleção e ordenação das alternativas de sites para instalação de usinas solares fotovoltaicas;
- MCDM, utilizando critérios empresariais na ordenação de alternativas de sites para instalação de usinas solares fotovoltaicas e também na ordenação de fontes de energias renováveis.

2.1 O SIG

O SIG pode ser definido como um conjunto de ferramentas para consultar, analisar, desenvolver, manipular, armazenar e editar dados e mapas digitais, em suma, para tratar informações geográficas (LOZANO *et al.*, 2013). Assim, os SIG são sistemas que trabalham com bases de dados de informação geográfica.

Em um mapa digital associado a uma base de dados, as coordenadas geográficas de cada ponto podem ser obtidas, isto significa que é possível pesquisar em diversas direções, obter informações no mapa ou realizar a pesquisa diretamente a partir da base de dados.

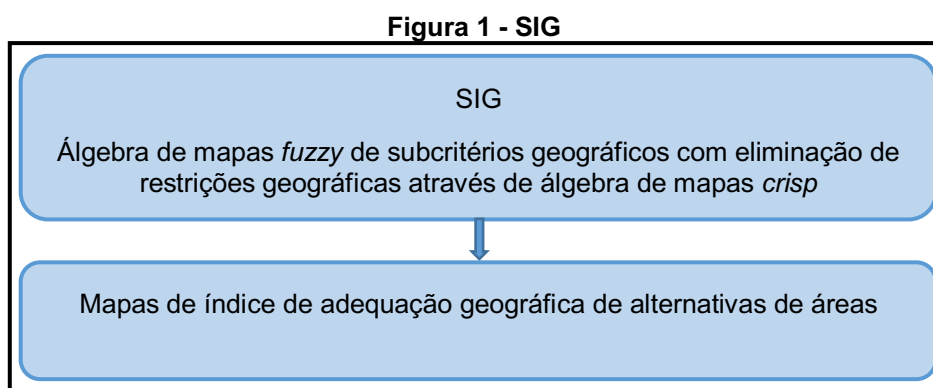
Existem dois tipos de representação SIG (TAHRI, 2015), por dados de varredura ou *raster* e por dados vetoriais:

- Na estrutura de dados *raster* existe uma malha ou grade de retângulos de mesmo tamanho, onde cada elemento é denominado de pixel associado a dados e localização geográfica.
- Na estrutura de dados vetoriais, as características geográficas no SIG são expressas como elementos geométricos vetoriais de pontos, linhas e polígonos contendo informações associadas à base de dados referentes as características geométricas das geometrias espaciais.

A modelagem de adequação espacial com SIG é cada vez mais utilizada como uma técnica para identificar locais potenciais para geração de energia renovável, pois o SIG é uma ferramenta útil para coleta, organização de dados espaciais geográficos e também como filtro na seleção de áreas com maior grau de adequação para geração de energia (JANKE, 2010).

2.2 O MODELO SIG

O processo de pesquisa envolvendo tomada de decisões em empreendimentos de energia renovável, iniciou com aplicação de SIG através da álgebra de mapas *fuzzy* de subcritérios geográficos do tipo irradiação, temperatura, declividade, aspecto e distância a rodovias com eliminação de restrições geográficas através da álgebra de mapas *crisp* do tipo unidades de conservação, uso do solo e distância de cidades e vilas ao gerar mapas de índice de adequação geográfica de alternativas de sites para instalação de plantas fotovoltaicas (Figura 1).



Fonte: O Autor (2021)

A Tabela 1 apresenta trabalhos nesta linha de pesquisa de localização de sites para instalação plantas fotovoltaicas aplicando modelo SIG.

Tabela 1 - Pesquisas modelo SIG

Autores	Resultados
Brewer et al. 2015	Gerou mapas de índice de potencial de energia solar com aceitação social do sudoeste dos Estados Unidos.
Janke 2010	Identificou 191 km ² de áreas no noroeste do Colorado altamente adequadas para fazendas solares.
Sabo et al. 2016	Identificou na Malásia de 10.092 km ² para instalação de plantas fotovoltaicas de grande porte.
Wang S. et al. (2016)	Selecionou 4005 locais adequados para projetos de energia fotovoltaica nas regiões de Shigatse e Ngari no Tibete na China.
Maleki et al (2017)	Avaliou o tamanho e localização de áreas para projetos fotovoltaicos, considerando a qualidade e custo da energia em Birjand no Irã.

Fonte: O Autor (2020)

2.3 O MCDM

Do ponto de vista dos investidores, é fundamental compreender que o investimento em uma planta fotovoltaica é uma tarefa complexa, envolvendo *stakeholders* com diferentes cenários de interesse, diversos critérios de tomada de decisão, riscos e incertezas. Para abordar essas questões complexas, os métodos de tomada de decisão multicritério têm desempenhado um papel fundamental na tratativa de critérios conflitantes e das preferências dos tomadores de decisão. Estudos têm sido desenvolvidos na área de energia utilizando métodos multicritério, envolvendo planejamento energético (ROJAS *et al.*, 2015; ERVURAL *et al.*, 2018), eficiência energética industrial (SOLA *et al.*, 2011, 2012; MACEDO *et al.*, 2018) e fontes de energia renováveis (MOURMOURIS; POTOLIAS, 2013).

Os conceitos de MCDM requerem a modelagem da estrutura de preferências dos tomadores de decisão, considerando seus julgamentos de valores a partir de objetivos conflitantes (ALMEIDA *et al.*, 2017). Neste sentido, Roy (1996) classifica os métodos multicritério em critério único de síntese, superação e interativo, sendo que a compensação entre critérios também pode ser uma forma de classificação. A compensação se refere a um *trade-off* entre os critérios, onde o tomador de decisão obtém uma vantagem em um critério para compensar a desvantagem em outro critério (BOUYSSOU, 1986).

Assim, o critério único dos métodos de síntese é de natureza compensatória, fazendo uso do procedimento de agregação aditiva (Tabela 2), enquanto os métodos que usam relações de sobreclassificação ou superação (*outranking*), tais como: ELECTRE - *Elimination and Choice Translating Algorithm* (ROY, 1996) e

PROMETHEE - *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (BRANS; MARESCHAL, 2005) são de natureza não compensatória, baseados em comparação paritária entre alternativas ao explorar a relação de sobreclassificação de característica não transitiva, também não realizam em geral uma agregação analítica visando estabelecer score entre alternativas, assumindo inclusive a possibilidade de incomparabilidade na estrutura de preferência do decisor.

Tabela 2 - Métodos MCDM compensatórios

Autores	Métodos
Saaty (1994)	AHP - <i>Analytical Hierarchy Process</i> .
Keeney e Raiffa (1976)	MAUT - <i>Multi-Attribute Utility Theory</i>
Edwards (1977)	SMARTS - <i>Simple Multi Attribute Rating Technique</i>
Edwards e Barron (1994)	SMARTER - <i>Simplified multi-attribute rating approach exploiting ranks</i>
Bana et al. (1994)	MACBETH - <i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
Almeida et al. (2016)	FiTradeoff - <i>Flexible Interactive Tradeoff</i>
Lagrèze e Siskos (1982)	UTA - <i>Utilité Additive</i>
Malczewski (2000)	WLC - <i>Weighted Linear Combination</i> .
Gorsevski (2012)	OWA - <i>Ordered Weighted Average</i> .
Melia (2016)	SAW - <i>Simple Additive Weighting</i> .
Hwang e Yoon (1981)	TOPSIS - <i>Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions</i> .
Opricovic e Tzeng (2007)	VIKOR - <i>compromise ranking method</i> .
Zavadskas et al. (2008)	COPRAS - <i>COmplex PRoportional ASsessment</i>

Fonte: O Autor (2020)

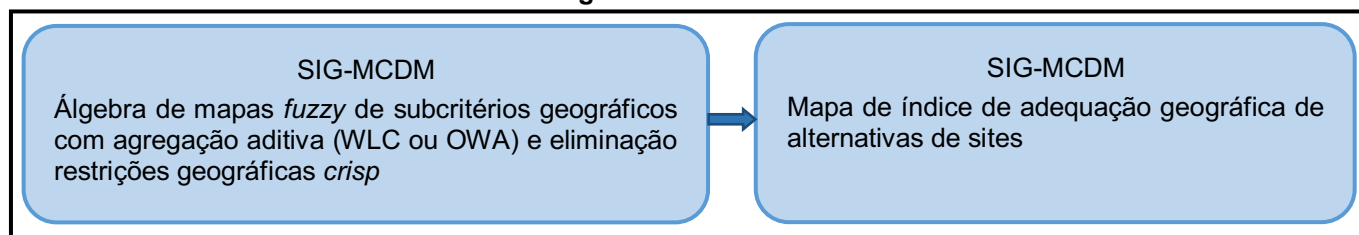
Deve-se ater ao fato de que o uso de critérios compensatórios e não compensatórios no mesmo método multicritério pode mudar a ordem das alternativas (ROY; BOUYSSOU, 1986).

Outro aspecto, é que com objetivo de modelar imprecisões de dados referentes a medições ou cálculos, que refletem em incertezas de preferências nos tomadores decisões para atingirem seus objetivos, pesquisadores aplicaram conjuntos de números *fuzzy* estendendo métodos compensatórios e não compensatórios.

2.4 MODELO SIG-MCDM

Paralelamente as aplicações com álgebra de mapas *fuzzy* de subcritérios geográficos com eliminação de restrições geográficas no SIG alguns pesquisadores modelaram o SIG-MCDM (Figura 2) inserindo soma ponderada na etapa de álgebra de mapas no SIG através dos métodos *Weighted Linear Combination* (WLC) ou *Ordered Weighted Average* (OWA), com pesos calculados primordialmente pelo AHP.

Figura 2 - SIG-MCDM



Fonte: O Autor (2021)

A Tabela 3 apresenta trabalhos na linha de pesquisa de localização de sites para instalação plantas fotovoltaicas aplicando o modelo SIG-MCDM.

Tabela 3 - SIG-MCDM

Autores	Métodos e Resultados
Aydin et al. (2013)	Aplicando SIG-MCDM (OWA) ao gerar mapas de índices de desempenho global para objetivos ambientais e viabilidade econômica, indicando as províncias de Aydin, Usak, Burdur, Denizli e Mugla na Turquia como prioridades para locais de energia fotovoltaica.
Al Garni e Awasthi (2017)	Aplicando AHP ao definir os pesos utilizados no método SIG-MCDM (WLC) ao gerar um mapa de índice de adequação da Arábia Saudita com 16% de área mais adequada para instalação de mini usinas fotovoltaicas.
Wanderer e Herle (2015)	Aplicando AHP ao definir os pesos utilizados nos métodos SIG-MCDM (WLC e OWA) ao gerar um mapa de adequação de energia solar para a Andaluzia, na Espanha, mostrando que existem mais sites adequados no Vale do Guadalquivir.
Merrouni et al. (2018)	Aplicando MCDM (AHP) ao definir os pesos para agregação do índice de adequação dos mapas de subcritérios categorizados, determinando que o leste de Marrocos dispõe de 19% de área adequada para a instalação de grandes centrais fotovoltaicas

Fonte: O Autor (2020)

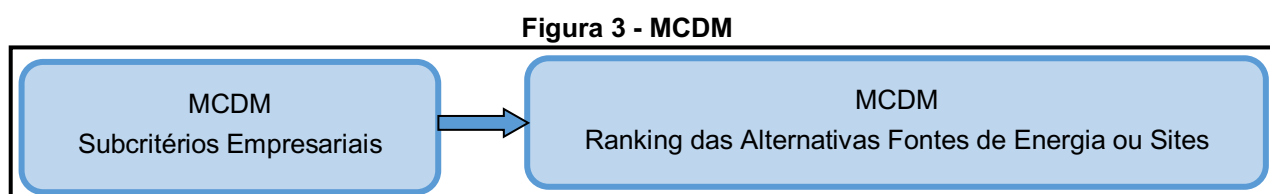
Merecem destaque, devido aos avanços históricos recentes em multicritério espacial (SIG-MCDM) as pesquisas de Charabi; Gastli (2011) ao aplicarem extensão *fuzzy* multicritério, Lozano *et al.* (2013) ao aplicarem o método AHP-TOPSIS e Tahri *et al.* (2015) ao aplicarem mapas categorizados:

- Charabi e Gastli (2011), aplicando álgebra de mapas de critérios geográficos com eliminação de restrições geográficas e agregação por *Fuzzy Logic Ordered Weight Averaging* (FLOWA), obtendo mapa resultante de Omã apresentando 0,5% da área total com alto índice de adequação para implementar grandes plantas fotovoltaicas;

- Lozano *et al.* (2013), aplicando álgebra de camadas de mapas de critérios geográficos com eliminação de restrições geográficas e avaliação das alternativas de acordo com o grau de adequação através do método multicritério TOPSIS, implementado na calculadora de campos com pesos calculados pelo método AHP, obtendo mapas de Murcia na região da Cartagena da Espanha apresentando 3.2% de áreas com índice de adequação excelente para instalação de usinas fotovoltaicas;
- Tahri (2015), aplicando mapas categorizados de critérios geográficos por índices de adequação com eliminação de restrições geográficas e agregação por pesos calculados no AHP, obtendo mapa de Marrocos indicando que a região de Ouarzazate tem alta adequação para a instalação de fazendas solares.

2.5 MODELO MCDM

Neste mesmo período pesquisadores aplicaram métodos MCDM (Figura 3) com subcritérios empresariais técnico-econômicos e socioambientais mais especificamente em planejamento energético de uma forma geral.



Fonte: O Autor (2021)

A Tabela 4 apresenta trabalhos nesta linha de pesquisa de ordenação de sites para instalação plantas fotovoltaicas, ou de ordenação de alternativas de fontes de energias aplicando modelos com métodos MCDM.

Tabela 4 - MCDM

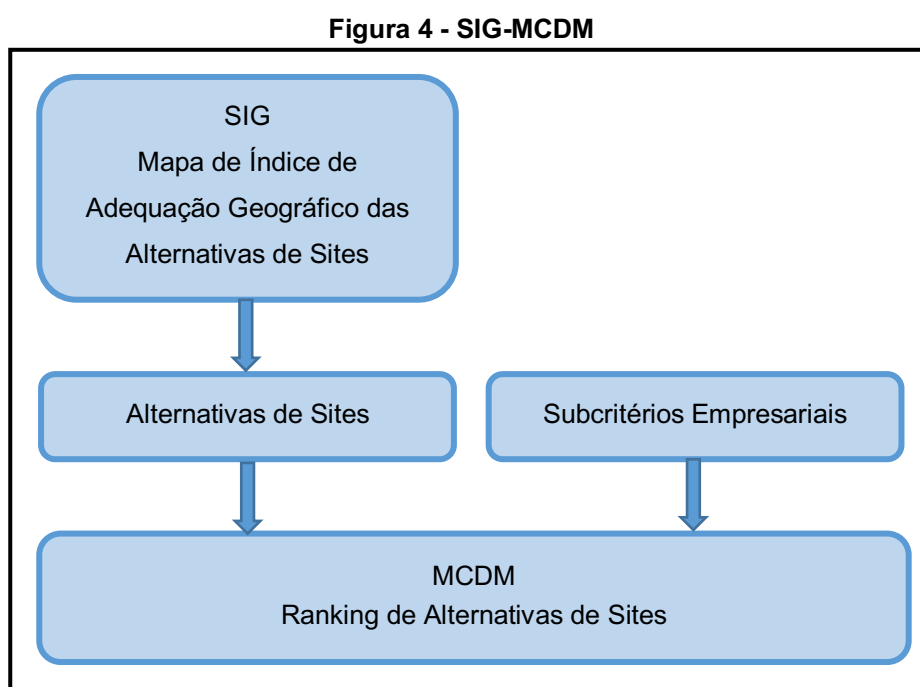
Autores	Métodos e Resultados
Mourmouris e Potolias (2013)	Aplicando o método REGIME com critérios empresariais e restrições ambientais e de uso do solo para ordenar fontes de energias renováveis com base em eficiência energética para instalação na ilha de Thassos na Grécia.
Vafaeipour et al. (2014)	Aplicando <i>Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis - Weighted Aggregates Sum Product Assessment</i> (SWARA-WASPAS) com critérios empresariais e irradiação solar na priorização de alternativas de sites para localização de usinas fotovoltaicas no Irã.
Lee e Chang (2018)	Aplicando critérios empresariais em quatro métodos MCDM: <i>Compromise Ranking Method</i> (VIKOR), <i>Technique for Order Preference by Similarity Ideal Solution</i> (TOPSIS), <i>Weighted Sum Model</i> (WSM) e <i>ELimination Et Choice Translating REality</i> (ELECTRE) ao avaliarem energia renovável em Taiwan, obtendo o seguinte resultado de ranking de energias: solar-eólica, solar, eólica, biomassa e geotérmica.
Wu, Xu e Zhang (2018)	Aplicando teoria dos conjuntos fuzzy com critérios empresariais, para lidar com a imprecisão de avaliações no processo de tomada de decisão para refletir a preferência de risco de tomadores de decisão em ambiente incerto ao avaliarem alternativas de energias renováveis na China.
Karasan et al. (2019)	Aplicando critérios empresariais nos métodos <i>Combinative Distance Based Assessment</i> (CODAS) e <i>Crisp and Fuzzy CODAS</i> ao selecionar sites para a construção de um parque eólico na Turquia.
Samanlioglu e Ayag (2017)	Aplicando <i>Fuzzy AHP</i> (F-AHP) e <i>Fuzzy Preference Ranking Organization Method Enrichment Evaluation</i> (F-PROMETHEE) com critérios empresariais ao avaliar sites alternativos para plantas solares na Turquia.

Fonte: O Autor (2020)

Observa-se que os modelos SIG e SIG-MCDM aplicando critérios geográficos e MCDM aplicando critérios empresariais são complementares, pois o SIG e o SIG-MCDM apresentam pontos fortes ao selecionarem e ordenarem áreas alternativas do ponto de vista geográfico, mas não consideram as características empresariais técnico-econômicas e socioambientais, já os modelos com métodos MCDM apresentam pontos fortes ao selecionarem e ordenarem áreas alternativas do ponto de vista empresarial, mas não consideram as características geográficas climáticas, geomorfológicas, de localização e de uso da terra.

3 MODELO SIG-MCDM PROPOSTO

A Figura 4 apresenta uma visão geral do modelo SIG-MCDM proposto para a seleção e **ordenação** de alternativas de sites para instalação de usinas fotovoltaicas, modelo a ser aplicado em regiões caracterizadas por grande heterogeneidade de clima, geomorfologia, localização, uso da terra, condições técnico-econômicas e socioambientais.



Fonte: O Autor (2021)

Visando resolver este problema de localização de sites para instalação de usinas solares fotovoltaicas, propõe-se a seguinte modelagem SIG-MCDM:

- Identificação do problema;
- Identificação dos *stakeholders*;
- Identificação e geração de mapas de critérios e restrições geográficas;
- Identificação de alternativas geográficas de sites;
- Identificação dos critérios e subcritérios empresariais;
- Identificação e aplicação dos métodos de tomada de decisão multicritério.

a) Identificação do problema

Trata-se de um problema de identificação de locais mais adequados para instalação de usinas fotovoltaica envolvendo duas dimensões: a espacial e a de interesses dos investidores, cujos riscos devem ser compensados pelos custos e benefícios dos locais escolhidos, levando em conta as heterogeneidades geográficas, técnico-econômicas e socioambientais.

b) Identificação dos *stakeholders*

Em função do problema de identificação de locais mais adequados para instalação de usinas fotovoltaica, se faz necessário:

- Identificar um grupo de *stakeholders* com diferentes cenários de interesses e experiência em tomadas de decisão em nível estratégico empresarial e com vivência em projetos privados e estatais representando os interesses do governo, investidores, fornecedores e sociedade;
- Considerar a participação de *stakeholders* de investidores, públicos ou privados do setor de energia, que são essenciais para alavancar as energias renováveis; portanto, um modelo de decisão que considere o investidor como tomador de decisões é decisivo para aprimorar os investimentos nessa área, lembrando da importância da participação de *stakeholders* de áreas sociais e ambientais;
- Considerar que cada *stakeholder* utiliza heurísticas de decisão específicas que precisam ser respeitadas, caracterizadas por acessos mentais que considera confiáveis e convenientes para julgamentos de valor com base normalmente em ancoragem em algum critério aleatório, ou no último critério usado, ou no critério que considera mais importante, de forma a diminuir suas opções ao ser confrontado com várias alternativas para resolver problemas de tomada de decisão sob incertezas e/ou riscos.

c) Identificação e geração de mapas de critérios e restrições geográficas:

Inicia-se com a identificação de critérios, subcritérios e restrições geográficas da região em avaliação, a partir da literatura e se possível com a participação de especialistas interessados em planejamento de energias renováveis.

Um aspecto fundamental a ser considerado com relação aos subcritérios geográficos oriundos da literatura e geralmente utilizados em aplicações de localização de sites para instalação de plantas fotovoltaicas está relacionado ao caráter não compensatório destes subcritérios em função de sua natureza, não havendo como ganhar eficiência energética significativa em locais:

- Com baixa temperatura média, que não é compensada devido a ocorrência natural de baixa irradiação solar, é o que ocorre em regiões de climas subárticos ou semiáridas frios, ou de tundra, como na parte mais nas latitudes extremas do planeta, exigindo o uso de energias híbridas em habitats com isolamentos térmicos e equipamentos de baixíssimo consumo, comum em bases científicas modernas em regiões polares, o que também aumenta significativamente os custos;
- Distante de estradas pavimentadas, ou de redes de energia que não é compensado por um baixo declive ou face norte do terreno no caso do hemisfério sul, exigindo pesados investimentos em construção de estradas, ou de linhas de transmissão de energia;
- Face sul do terreno no hemisfério sul, que não é compensada nem por alta irradiação, temperatura média anual amena, ou declividade baixa, exigindo maiores investimentos para correção, quando possível, da face do terreno através de terraplenagens e adequação de estruturas metálicas de suporte de painéis fotovoltaicos.

Outro aspecto importante é que a compensação entre subcritérios geográficos está atrelada ao contexto do tamanho e da adequação da região a ser avaliada, que pode dispor de milhões de alternativas de áreas adequadas para instalação de plantas fotovoltaicas, onde a perda de adequação em um subcritério geográfico pode eliminar a seleção de uma determinada alternativa de área.

Uma vez identificados os critérios, subcritérios e restrições geográficas, passa-se a geração dos mapas de subcritérios e restrições geográficas da área em avaliação através de modelagem cartográfica, compreendendo os processos de:

- Coleta dos mapas de subcritérios e restrições geográficas a partir de instituições nacionais e/ou internacionais com aplicação do *datum* do Sistema de Referência Geocêntrico associado a melhor resolução;
- Definição adequada da projeção dos mapas, evitando distorção das propriedades espaciais de distância, área, forma e direção, com posterior conversão dos mapas para a projeção definida, utilizando as funções de conversão dos sistemas de referência de coordenadas disponíveis nos SIG, seguido da definição de escala.

d) Identificação das alternativas geográficas de sites:

Visando a identificação das alternativas geográficas de sites de diversas regiões a partir dos mapas modelados de subcritérios e restrições geográficas, executam-se os seguintes procedimentos no SIG:

- Rasterização dos mapas vetoriais de subcritérios e restrições geográficas, obtendo mapas de varredura ou imagem matricial, denominados de *rasters*, sendo constituídos de pixels;
- Fuzzificação linear, ou trapezoidal, ou triangular, ou J, ou sigmoideal dos mapas *rasters* de subcritérios geográficos e aplicação de conjuntos *crisp* nos mapas *rasters* de restrições geográficas, obtendo respectivamente mapas *fuzzy* (0 a 1) e *crisp* (0 ou 1) denominados de mapas de índice de adequação de subcritérios e restrições geográficas;
- Simulações da álgebra de mapas (Equação 3.1) aplicando soma ponderada de mapas *fuzzy* de subcritérios geográficos com eliminação booleana *AND* de restrições geográficas *crisp*, utilizando a técnica WMPDP (*Weighting by Maximum Pertinence Degree of Pixels*) no cálculo dos pesos da soma ponderada para se obter o mapa de índices de adequação geográfico máximo com valores de pixels que variam de 0 (pixel ou área inadequada) a 1 (pixel ou área altamente adequada):

$$I = \sum_j^n W_i C_i \text{ AND } \prod_{j=1}^m R_j \quad (3.1)$$

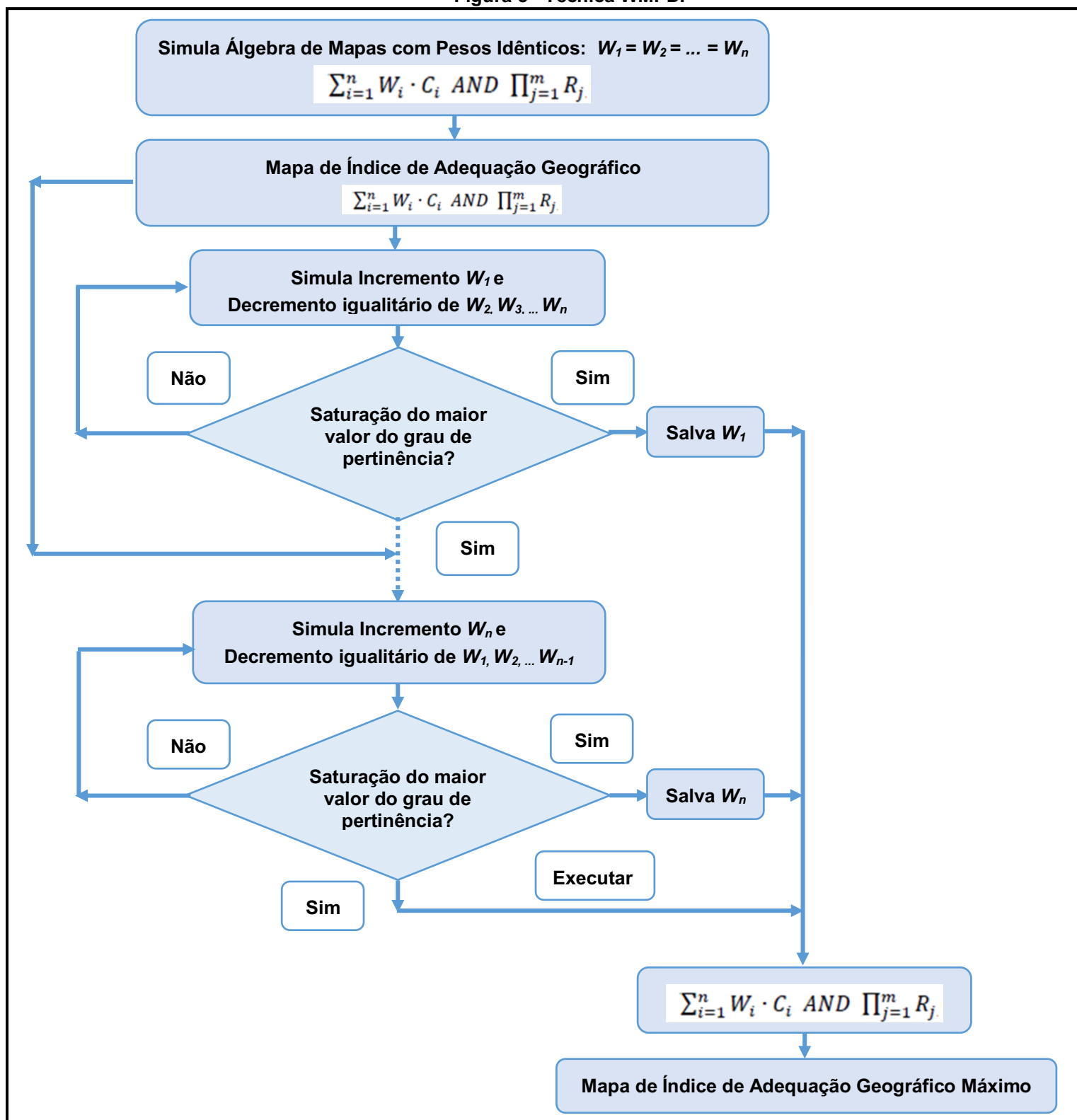
Onde: I é o índice de adequação ou grau de pertinência do pixel, W_i são os pesos dos i critérios, C_i são os mapas *fuzzy* dos i subcritérios, R_j são os j mapas *crisp* de restrição.

- Identificação das áreas com maiores índices de adequação através da estatística do mapa de índice de adequação geográfico máximo.

Segue o detalhamento da citada técnica WMPDP que é baseada na análise de sensibilidade dos graus de pertinência de um mapa de índices de adequação geográfico, consistindo de sucessivas simulações (Figura 5) da álgebra de mapas através da Eq. 3.1:

- Simula-se a álgebra de mapas *fuzzy* de subcritérios com eliminação booleana de restrições geográficas *crisp* aplicando pesos normalizados iguais (SUURONEN *et al.*, 2017), gerando um mapa de índices de adequação geográfico;
- Simulam-se alternadamente novos mapas de índices de adequação geográfico, sempre incrementando o peso de um dos mapas *fuzzy* de subcritérios geográficos e decrementando igualmente os pesos dos demais mapas *fuzzy* até a ocorrência da saturação do maior valor do grau de pertinência, quando o incremento de peso não reflete mais em incremento significativo do valor do maior grau de pertinência dos pixels, obtendo sucessivamente os pesos finais de cada mapa *fuzzy* de subcritério;
- Executa-se ao termino das simulações a álgebra de mapas com os pesos finais obtidos para cada mapa *fuzzy* de subcritério normalizado para se obter o mapa de índice de adequação geográfico máximo.

Figura 5 - Técnica WMPDP



Fonte: O Autor (2021)

É importante observar que a maioria dos atuais modelos SIG-MCDM obtêm os pesos através de pesquisas com especialistas pelo método compensatório multicritério AHP ao executar a álgebra de mapas de índices de adequação de subcritérios geográficos pela soma ponderada (WLC) sem a observância das características não compensatórias destes mapas, o que pode levar a equívocos na seleção de sites para instalação de centrais fotovoltaicas.

Diferentemente, a técnica WMPDP proposta não obtêm pesos com base na percepção de pesquisadores, mas sim com base na realidade a partir de simulações da álgebra de mapas *fuzzy* das variáveis físicas do ambiente geográfico (subcritérios geográficos) avaliando a saturação do maior grau de pertinência dos pixels de forma a evitar possíveis equívocos das avaliações feitas por especialistas, muitas vezes conflituosas.

Neste sentido, deve-se ter em mente por exemplo, que o grau de pertinência de um pixel de um mapa *fuzzy* de temperatura com valor entre 0 a 1 é uma função de pertinência daquele pixel no mapa de temperatura em graus centígrados do ambiente geográfico avaliado.

e) Identificação dos critérios e subcritérios empresariais:

Identificada as áreas com maiores índices de adequação no mapa de índice de adequação geográfico máximo, deve-se avaliar se são áreas que garantem sustentabilidade para os empreendimentos em energia fotovoltaica.

A questão é saber “se onde é melhor geograficamente é viável empresarialmente”, respondida pelo uso de critérios e subcritérios empresariais de forma a garantir cenários de sustentabilidade socioeconômica e ambiental ao empreendimento.

A identificação de critérios e subcritérios empresariais é feita a partir da literatura, sendo avaliado o seu uso corrente no setor de energia e suas características compensatórias pelos *stakeholders*, onde o tomador de decisão pode aceitar um aumento de custo do investimento se a capacidade de geração também aumentar, ou um aumento nos custos de operação e manutenção se houver uma maior demanda ou melhoria do desempenho e da confiabilidade no fornecimento de energia.

f) Identificação e aplicação dos métodos de tomada de decisão multicritério:

A aplicação de métodos MCDM utilizando critérios empresariais é de extensa utilização em problemas de planejamento energético (ZERPA; YUSTA, 2015), tendo como uma das vantagens permitir as partes interessadas de chegarem a um acordo a partir da avaliação de múltiplos critérios conflitantes pertencentes a múltiplas dimensões.

No caso do processo de tomada de decisão para localização de sites para instalação de empreendimentos de energia descentralizados, típico em várias energias renováveis, os seguintes fatores, dentre outros, influenciam significativamente na escolha do método multicritério:

- O contexto do processo decisório das empresas investidoras do setor de energia, onde normalmente existem múltiplos tomadores de decisão ou investidores em conflitos, dificultando consensos em função das capacidades de negociações individuais, levando em momentos econômicos complexos a decisões mais individuais;
- A visão durante o processo de decisão dos tomadores de decisão e investidores com relação a real importância entre os objetivos estratégicos empresariais de interesses com respectivos objetivos fundamentais (critérios) e meios (subcritérios) e suas compensações racionais de forma a garantir a sustentabilidade dos empreendimentos de energias renováveis.

Levando em conta os fatores comportamentais dos decisores supracitados e a longevidade típica das empresas concessionárias de energia, vivenciando:

- Momentos de dificuldades econômicas implicando em um maior nível de conflitos, onde muitas vezes o consenso se torna extremamente difícil em longas e extenuantes reuniões com altos níveis de tensão, levando a tomadas de decisões mais centralizadas e individuais entre diretores ou investidores;
- Momentos de abundância econômica apresentando menores níveis de tensões e conflitos, com tomadas de decisões mais descentralizadas e

coletivas, incluindo muitas vezes outros tomadores de decisão de níveis gerenciais devido a uma maior delegação de poderes.

Considerando ainda uma matriz decisão ou de consequências típica do setor de energia com valores cardinais das performances ou desempenhos das alternativas, calculados e/ou oriundos de banco de dados de acesso público, onde se deve avaliar:

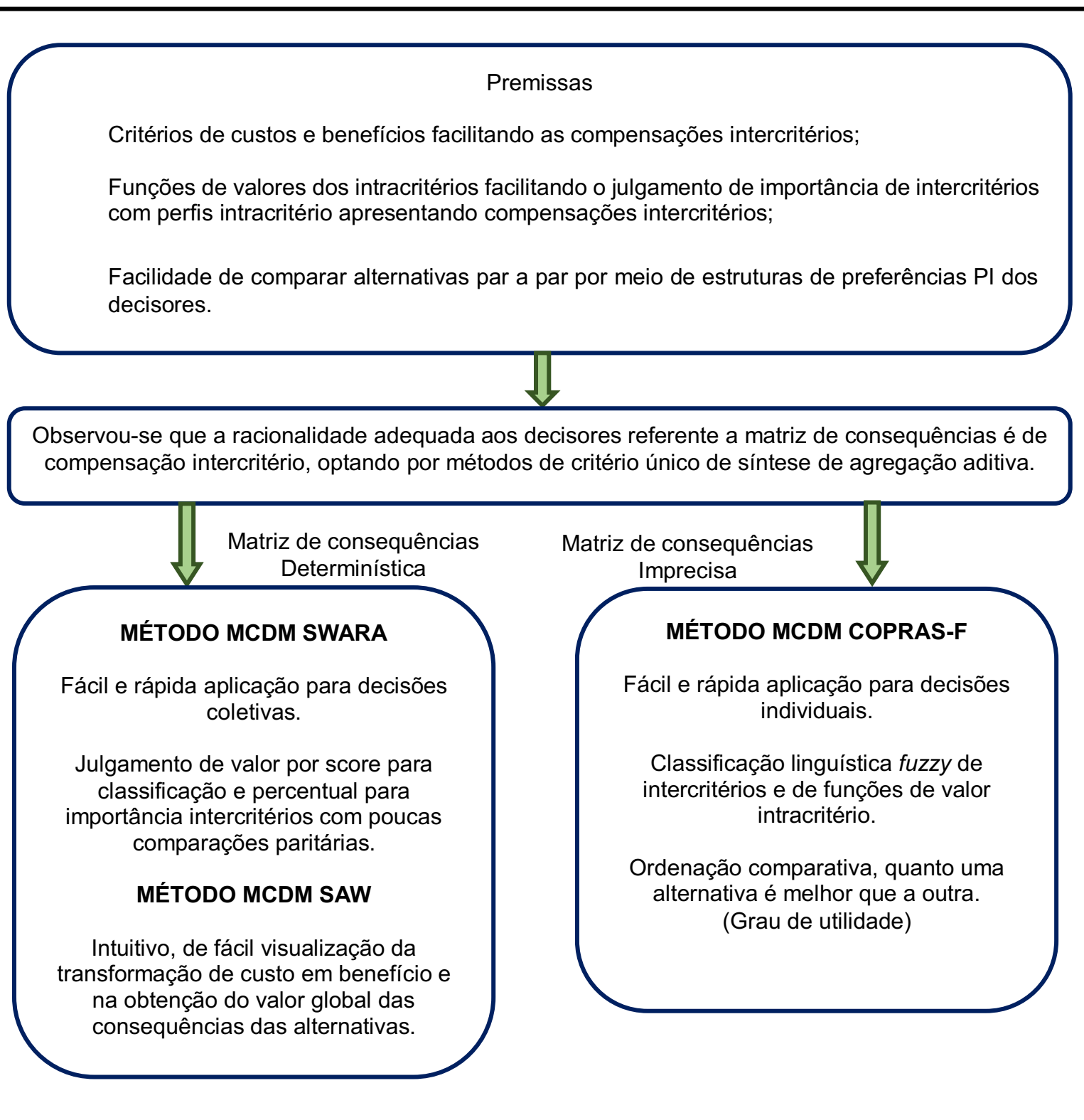
- Se a matriz de consequência é formada por critérios de custos e benefícios facilitando as compensações intercritérios;
- Se as funções valores intracritérios facilitam o julgamento de importância de intercritérios;
- Se o range de algumas funções valores intracritério são estreitos com possibilidades da ocorrência de imprecisões quando associado a medições ou cálculos aproximados ou inexatos gerando incertezas nas preferências dos decisores em alcançar seus objetivos, implicando na aplicação de métodos multicritérios associados a números *fuzzy*;
- Se o perfil intracritério das funções valores facilita a visualização de compensações intercritérios;
- Se os decisores estabelecem facilmente comparações paritárias entre alternativas por meio de estrutura de preferências estritas e indiferenças (PI) com relação as consequências das alternativas e a inexistência de incomparabilidades.

Associando os perfis das empresas concessionárias de energia e dos decisores do setor de energia a uma matriz de consequências típica do setor elétrico, conforme mostrado na Figura 6, optou-se pela aplicação de dois métodos multicritérios, o *Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis - Simple Additive Weighting* (SWARA-SAW) e o *Complex Proportional Assessment Fuzzy* (COPRAS-F).

Sendo o SWARA-SAW e o COPRAS-F de características compensatórias com agregação aditiva, refletindo as características observadas na matriz de consequências e nos processos de tomadas de decisões do setor elétrico, permitindo uma comparação dos possíveis cenários a se materializarem influenciados pelo comportamento dos *stakeholders* quando decidindo mais individualmente ou

coletivamente em função dos momentos e das estratégias de delegação de poderes vivenciados pelas empresas, ora centralizados, ora descentralizados.

Figura 6 - Seleção dos métodos MCDM



Observa-se que o SWARA-SAW é um método multicritério híbrido apresentando características do SWARA e do SAW, onde:

- O SWARA é utilizado nos cálculos dos pesos do SAW, sendo um método elaborado para o nível estratégico de decisão e formulação de políticas empresariais (VAF AEIPOUR *et al.*, 2014; NEZHAD *et al.*, 2015), com uma variante que permite avaliação de classificação dos critérios e subcritérios por parte de tomadores de decisão, inclusive de forma coletiva e consensual;
- O SAW é um método quantitativo de característica compensatória em seu processo de agregação e de fácil aplicação, onde funções valores de critérios cardinais auxiliam na objetividade das decisões.

O COPRAS-F é um método multicritério quantitativo aplicável com funções valores de critérios imprecisos, tendo característica compensatória em seu processo de agregação e natureza linguística e difusa, o que facilita sua aplicação na solução de conflitos em tomadas de decisão com julgamentos individuais e não consensuais.

Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA)

Ao definir prioridades a partir de pesquisas com os *stakeholders*, percebe-se claramente que o SWARA apresenta como características satisfatórias:

- Lidar com a capacidade de estimar a opinião de *stakeholders* sobre a proporção ou razão de importância dos critérios e subcritérios no processo de determinação de pesos (ZOLFANI *et al.*, 2018);
- Coletar dados dos *stakeholders* de forma simples não exigindo conhecimento prévio do método, com poucas comparações par a par no julgamento de valor com relação as preferências dos decisores em relação a critérios e subcritérios (ZOLFANI *et al.*, 2018; STANUJKIC *et al.*, 2018), sendo assim amigável para tomadas de decisão coletivas com troca de ideias e negociações em momentos mais descentralizados das empresas com maior delegação de poderes;

- Integrar-se com outros métodos multicritérios, que necessitam de cálculos externos de pesos;
- Tratar com facilidade o processo de classificação e comparações relativas de importância entre critérios e subcritérios (STANUJKIC *et al.*, 2018);
- Apresentar facilidade de inserção de um novo subcritério ao tratar as alterações de pesos somente entre os subcritérios do critério onde ocorreu a inserção do subcritério;
- Apresentar análise de concordância entre opiniões de especialistas através de testes qui-quadrado (ZOLFANI *et al.*, 2018) das respostas da pesquisa de classificação de critérios e de subcritérios.

Por outro lado, percebe-se que o SWARA apresenta as seguintes limitações:

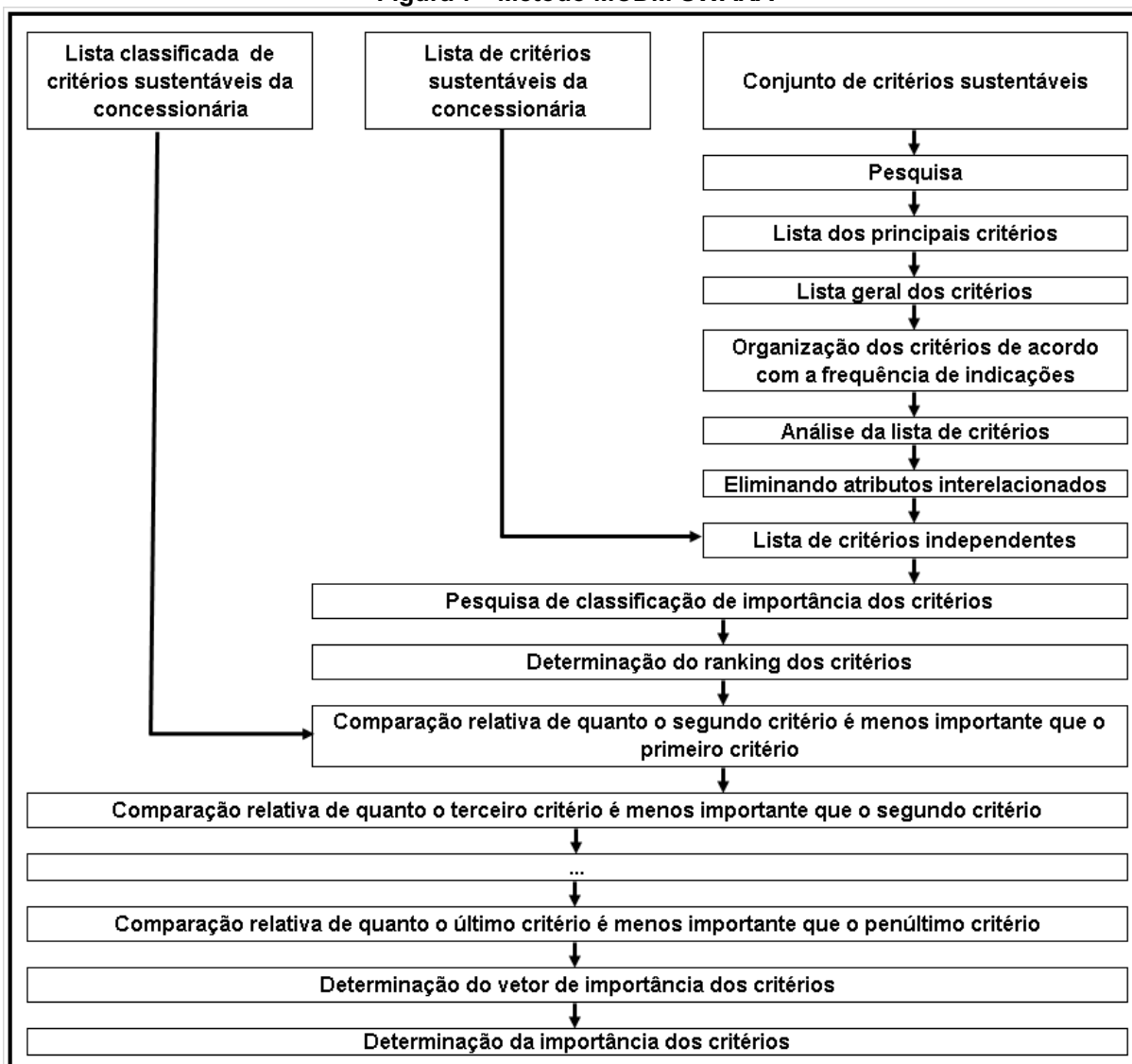
- Não apresenta uma análise de consistência relativa a efetividade das respostas das pesquisas de comparações relativas de importância entre critérios e entre subcritérios;
- A simplicidade das pesquisas de pesos associada a possibilidade de pouca interação entre analista e decisores pode induzir entendimentos diferenciados do problema de modo que as respostas não representem a real preferência dos decisores;
- A busca por consenso em reuniões coletivas para a determinação dos pesos pode tornar-se uma desvantagem já que pode levar a que líderes influentes distorçam a opinião do resto da equipe;
- A classificação dos critérios e subcritérios de forma coletiva geram dificuldades individuais a membros do grupo que não concordam com a classificação, levando a que respostas nas pesquisas de comparações relativas de importância não representem a real preferência destes decisores;
- A ausência na literatura de definições de escala de score para classificação de preferências par a par e de escala de porcentagem de importância para comparações relativas de importância, sendo que a estruturação equivocada de escalas pelo analista pode vir a gerar deformações nos processos de agregações dos cálculos das médias das classificações de

importância e das comparações relativas de importância levando normalizações errôneas e consequentemente vetores de importância de critérios e subcritérios inconsistentes.

O método SWARA apresenta três possibilidades de iniciar sua aplicação por uma empresa (Figura 7), a partir de:

- Um conjunto qualquer de critérios e subcritérios sustentáveis;
- Uma lista existente de critérios e subcritérios sustentáveis;
- Uma lista existente e já classificada de critérios e subcritérios sustentáveis.

Figura 7 - Método MCDM SWARA



Fonte: Adaptado de Vafaeipour et al. (2014)

Segue uma sequência para aplicação do SWARA em empresas concessionárias de energia:

- Definição de critérios e subcritérios de interesse das concessionárias de energia, que já foram amplamente discutidos em publicações especializadas, devendo ser submetidos a apreciação de *stakeholders* interessados em geração fotovoltaica;
- Determinação da classificação de importância dos critérios e respectivos subcritérios a partir da:
 - ✓ Aplicação de uma pesquisa de classificação de importância dos n critérios empresariais, junto a um grupo de tomadores de decisão de concessionária de energia, onde cada um estabelece uma ordem de importância do critério menos importante com score 1 ao mais importante com o score n ;
 - ✓ Obtenção da classificação dos critérios ao agregar os scores obtidos por cada critério, dividindo pelo número de tomadores de decisão;
 - ✓ Repetição do processo para cada grupo de subcritérios de cada critério.
- Determinação do vetor e da importância relativa dos critérios e respectivos subcritérios (VAF AEIPOUR *et al.*, 2014; JUODAGALVIENÉ *et al.*, 2017; MARDANI *et al.*, 2017; PANAHI *et al.*, 2017; ZOLFANI *et al.*, 2018) a partir da:
 - ✓ Aplicação de uma pesquisa de comparação relativa de importância entre os critérios, onde tomadores de decisão comparam o segundo critério mais importante com o primeiro mais importante, o terceiro critério mais importante com o segundo mais importante, assim sucessivamente, com base na seguinte linguística:
 - De igual importância (0% menos importante);
 - Pouco menos importante (20% menos importante);
 - Muito menos importante (40% menos importante);

- Bastante menos importante (60% menos importante);
- Extremamente menos importante (80% menos importante);
- Sem importância (100% menos importante).

✓ Cálculo dos valores médios da importância relativa por critério:

$$S_j = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{n} \quad (3.1)$$

Onde: A_i é o valor percentual da importância relativa comparativa entre critérios definida por especialista e n é o número de especialistas.

- ✓ Divisão dos valores de S_j por 100 obtendo valores de 0 a 1;
 - ✓ Cálculo por critério do coeficiente $K_j = S_j + 1$;
 - ✓ Cálculo por critério do peso $Q_j = Q_{j-1} / K_j$;
 - ✓ Normalização por critério do peso $W_j = Q_j / \sum Q_j$.
- Repetição do processo para cada grupo de subcritérios de cada critério, ao final com uma segunda normalização dos pesos dos subcritérios com base no valor normalizado do critério de origem.

Com relação as pesquisas linguísticas de comparação relativa de importância do SWARA, Vafaeipour (2014) e Zolfani (2014) aplicaram múltiplos de 5% na escala de importância sem esclarecimentos da amplitude da faixa da escala de comparação relativa de importância. Nesta pesquisa adotou-se em consenso com os decisores diferenças de 20% com faixa de escala de igual a sem importância de 0% a 100%.

Simple Additive Weighting (SAW)

O *Simple Additive Weighting* (SAW) é um método simples, bastante utilizado e eficiente, uma vez que os resultados são semelhantes a métodos mais complexos, sendo um método que compensa os desempenhos ruins de alguns critérios através de outros critérios, cujos procedimentos e álgebra é detalhada a seguir:

- Uma matriz de decisão de benefícios é obtida transformando critérios de custos (minimização) em critérios de benefícios (maximização), através da adição do valor máximo ao valor mínimo intracritério com subtração do valor de cada critério, tornando o critério de menor valor no de maior valor e o de maior valor no de menor valor;
- Normaliza-se a matriz de decisão de benefícios, dividindo o valor de cada critério pela soma intracritério;
- Agrega-se pelo somatório do produto dos valores dos critérios (alternativas) pelos respectivos pesos dos critérios (Equação 3.2) calculados pelo SWARA;
- Seleciona-se a alternativa de valor mais alto como a melhor solução.

$$A_{SAW} = \max_i \sum_j^n a_{ij}w_j \quad \forall i \quad (i = 1, \dots, m) \quad (3.2)$$

Onde:

A_{SAW} = pontuação da melhor alternativa i ;

n = número de critérios;

a_{ij} = desempenho da alternativa i em relação ao critério j ;

w_j = peso do critério j .

Segundo Podvezko (2011), o método SAW apresenta como principal vantagem a transformação linear proporcional dos dados brutos, significando que a ordem relativa de magnitude das pontuações padronizadas permanece igual, apresentando como limitações:

- Distorções nas estimativas das alternativas a depender do método de transformação de critérios de custos em benefícios;
- Distorções quando o valor de uma alternativa no critério de maior peso excede em muito os valores das outras alternativas, levando a alternativa a ser a melhor, embora com valores relativamente pequenos em outros critérios;

- Estimativas que não refletem a situação real, com resultados ilógicos em relação a valores de um critério particular muito diferente de outros critérios;

A necessidade de que pesos sejam calculados através de outro método multicritério pode ser vista como uma desvantagem do método, também deve ser dada atenção especial ao método de transformação dos subcritérios de custo em subcritérios de benefício no SAW associada a uma boa avaliação dos perfis das consequências das alternativas e aos pesos para verificar se não há ocorrência de distorções de ranking

Complex Proportional Assessment Fuzzy

O COPRAS-F foi introduzido por Zavadskas e Antucheviciene em 2007, sendo uma das técnicas multicritério de extensão fuzzy de tomada de decisão para determinar os pesos dos critérios e a ordenação de alternativas, através de termos linguísticos associados a números fuzzy a serem aplicados em funções de pertinência (CHATTERJEE; BOSE, 2012; YAZDANI *et al.*, 2018; NEZHAD *et al.*, 2015), apresentando as seguintes características satisfatórias:

- O conhecimento das propriedades do COPRAS-F permite evidenciar os benefícios da sua aplicação, avaliar a influência dos valores dos critérios de benefícios e custos no resultado final (estimativas) e verificar os cálculos considerando eventual instabilidade das estimativas geradas pelo método devido as características específicas dos dados reais (PODVEZKO, 2011);
- Permite que critérios de benefícios e custos sejam utilizados na matriz de decisão e que os valores de critérios sejam normalizados para que diferentes unidades de medidas possam ser usadas e comparadas;
- Atribui a melhor alternativa entre um conjunto de alternativas viáveis, determinando uma solução com a proporção para a solução ideal e para a solução ideal-pior (ZAVADSKAS e KAKLAUSKAS, 1996), assumindo dependência direta e proporcional entre o grau de importância ou pesos relativos das alternativas e o grau de utilidade;

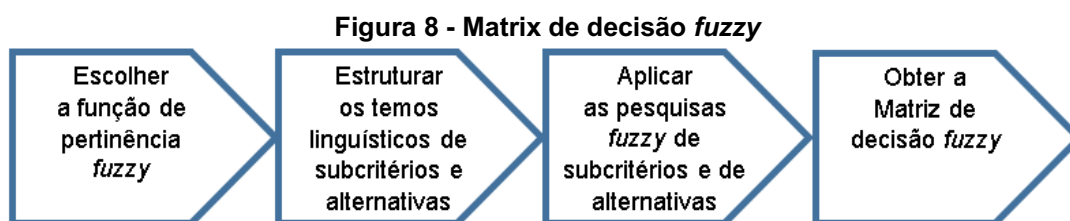
- Permite resolver complexidades e incertezas decorrentes de diversos critérios conflitantes ao aplicar a lógica *fuzzy*, que é capaz de modelar imprecisões de funções valores intracritérios através das dispersões laterais dos números linguísticos associados ao grau de pertinência de 0 a 1, sendo um conceito útil para lidar situações complexas ou não suficientemente bem definidas;
- Coleta os dados de decisão de forma individual, simples e amigável, agregando matematicamente como uma visão única de grupo as diversas visões individuais que muitas vezes são conflituosas entre decisores;
- Utiliza conjunto *fuzzy*, que é uma ferramenta matemática desenvolvida para lidar com as imprecisões de dados existentes em matrizes de decisão, sendo uma forma geral de um conjunto *crisp*.

Por outro lado, percebe-se como limitações:

- A dificuldade de entendimento por parte dos decisores com relação a complexidade matemática dos processos de fuzzificação e defuzzificação, associada a interpretação dos cálculos dos graus de importância;
- Distorções dos valores defuzificados dos pesos dos critérios, conseqüentemente do ranking, quando os decisores não avaliam criteriosamente o perfil intracritério das funções valores e as compensações intercritérios no processo de julgamento linguístico, perdendo a racionalidade de julgamento;
- Distorções dos valores defuzificados das alternativas, conseqüentemente do ranking, quando os decisores não avaliam criteriosamente o range intracritério das funções valores no processo de julgamento linguístico, perdendo a racionalidade de julgamento.

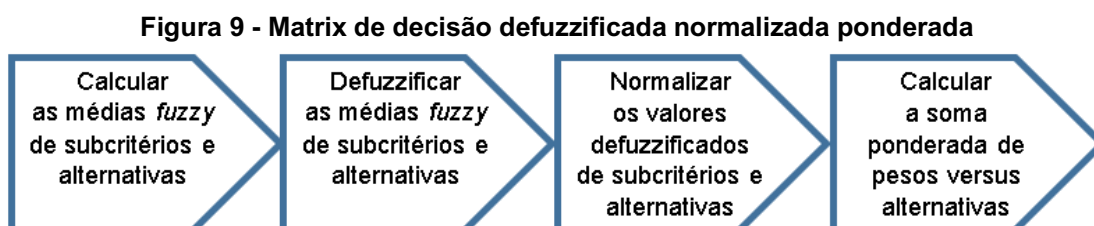
Chatterjee e Bose (2012) definiram uma sequência de procedimentos com base em conceitos matemáticos para a aplicação do COPRAS-F, adaptadas nesta pesquisa.

Inicialmente uma matriz *fuzzy* de decisão é obtida (Figura 8) a partir das pesquisas *fuzzy* de subcritérios e alternativas estruturadas com base em termos linguísticos associados a função de pertinência escolhida.



Fonte: O Autor (2020)

Na sequência uma matriz de decisão defuzzificada, normalizada e ponderada (Figura 9) é obtida a partir da matriz de decisão *fuzzy* através de cálculos das médias *fuzzy* de subcritérios e alternativas seguidos dos processos de defuzzificação pelo método do centro da área (COA), normalização e ponderação.



Fonte: O Autor (2020)

Finalmente o grau de utilidade e o ranking (Figura 10) são obtidos a partir da matriz de decisão defuzzificada, normalizada e ponderada através de cálculos dos pesos relativos e das prioridades das alternativas.

Figura 10 - Cálculos da significância prioridades e ranking

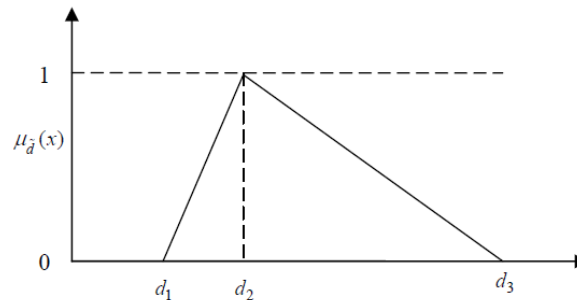


Fonte. O Autor (2020)

Seguem os detalhes dos procedimentos descritos acima com respectivas equações usadas nos cálculos do COPRAS-F:

- Escolha da função de pertinência triangular (Figura 11), considerando a simplicidade de aplicação em relação a outras funções de pertinência e também a maior facilidade de implementação e de processamento de informações em um ambiente difuso, apresentando as seguintes características:

Figura 11 - Função de pertinência fuzzy triangular



Fonte: Yazdani, Alidoosti e Zavadskas (2012)

- Números fuzzy (Figura 6) dispersados à esquerda (d_1), ao centro (d_2) e à direita (d_3), com fórmula definida pela Eq. 3.3:

$$\begin{aligned} \mu_x(x) &= 0 & x < d_1 \text{ ou } x > d_3 \\ \mu_x(x) &= (x - d_1)/(d_2 - d_1) & d_1 \leq x \leq d_2 \\ \mu_x(x) &= (x - d_3)/(d_2 - d_3) & d_2 \leq x \leq d_3 \end{aligned} \quad 3.3$$

- Graus de pertinência $\mu_x(x)$ pertencendo ao intervalo fechado 0 a 1, em que 0 expressa a não adesão e 1 expressa a adesão plena, enquanto os conjuntos *crisp* permitem apenas 0 ou 1 (Yazdani *et al.*, 2011);
- Defuzziificada pelo uso do método do centro da área (COA), simples e prático, onde o valor do *Best Non-fuzzy Performance* (BNP) para o número fuzzy pode ser encontrado usando a Eq. 3.4 para uma função de pertinência triangular:

$$BNP = \frac{[(d_3 - d_1) + (d_2 - d_1)]}{3} + d_1 \quad (3.4)$$

- Definição dos termos linguísticos de critérios e de alternativas (Tabela 5) expressos em números *fuzzy* triangulares;

Tabela 5 - Termos linguísticos

Termos Linguísticos para Critérios		Termos Linguísticos para Alternativas	
Termos Linguísticos	Número Fuzzy	Termos Linguísticos	Número Fuzzy
Extremamente Importante	(0.9, 1.0,1.0)	Excelente	(0.9, 1.0,1.0)
Altamente Importante	(0.7, 0.9,1.0)	Muito Boa	(0.7, 0.9,1.0)
Muito Importante	(0.5, 0.7,0.9)	Boa	(0.5, 0.7,0.9)
Importante	(0.3, 0.5,0.7)	Regular	(0.3, 0.5,0.7)
Pouco importante	(0.1, 0.3,0.5)	Fraca	(0.1, 0.3,0.5)
Muito Pouco Importantte	(0.0, 0.1,0.3)	Muito Fraca	(0.0, 0.1,0.3)
Sem Importância	(0.0, 0.0,0.1)	Pessima	(0.0, 0.0,0.1)

Fonte: Adaptado de Chatterjee e Bose (2012)

- Coleta através de pesquisas linguísticas junto a cada decisor dos termos linguísticos de importância de cada subcritério e da performance ou desempenho de cada alternativa;
- Transformação da coleta dos termos linguísticos das pesquisas em matrizes de decisão *fuzzy* dos k decisores (Eq. 3,5), cada uma com m linhas de números *fuzzy* de alternativas e n colunas de números *fuzzy* de subcritérios;

$$\begin{matrix}
 & & C_1 & & C_j & & C_n \\
 \left[\begin{matrix}
 DM^1 & \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11}^1 & \dots & \tilde{d}_{1j}^1 & \dots & \tilde{d}_{1n}^1 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{d}_{i1}^1 & \dots & \tilde{d}_{ij}^1 & \dots & \tilde{d}_{jn}^1 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{d}_{m1}^1 & \dots & \tilde{d}_{mj}^1 & \dots & \tilde{d}_{mn}^1 \end{bmatrix} \\
 DM^2 & \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11}^2 & \dots & \tilde{d}_{1j}^2 & \dots & \tilde{d}_{1n}^2 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{d}_{i1}^2 & \dots & \tilde{d}_{ij}^2 & \dots & \tilde{d}_{in}^2 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{d}_{m1}^2 & \dots & \tilde{d}_{mj}^2 & \dots & \tilde{d}_{mn}^2 \end{bmatrix} \\
 \vdots & & & & & & \\
 DM^k & \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11}^k & \dots & \tilde{d}_{1j}^k & \dots & \tilde{d}_{1n}^k \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{d}_{i1}^k & \dots & \tilde{d}_{ij}^k & \dots & \tilde{d}_{in}^k \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{d}_{m1}^k & \dots & \tilde{d}_{mj}^k & \dots & \tilde{d}_{mn}^k \end{bmatrix}
 \end{matrix} \right] \quad (3.5)
 \end{matrix}$$

Onde:

- DM^k são matrizes os k decisores (*Decision Makers*);
- A_m são as m alternativas;
- C_n são os n subcritérios;
- As k matrizes de decisão dos k decisores são constituídas de números *fuzzy* de funções de pertinência triangulares:

$$\tilde{d}_{ij}^k = d_{ij1}^k, d_{ij2}^k, d_{ij3}^k$$

- Cálculos das médias *fuzzy* de cada subcritério, somando os números *fuzzy* para cada subcritério das k matrizes de decisão divididos pelos números de decisores;
- Defuzzificações aplicando o método do centro da área nas médias *fuzzy* em cada subcritério (w_1, w_2, w_3), obtendo os pesos (W_j) dos subcritérios, usando a Eq. 3.6 estruturada com base no *Best Non-fuzzy Performance*:

$$w_j = \frac{[(w_3 - w_1) + (w_2 - w_1)]}{3} + w_1 \quad (3.6)$$

- Normalizações dos pesos dos j subcritérios com base na Eq. 3.7:

$$q_j = \frac{w_j}{\sum_{j=i}^n w_j} \quad (3.7)$$

- Cálculos das matrizes das médias *fuzzy* das alternativas, somando os números *fuzzy* de cada alternativa das k matrizes de decisão divididos pelos números de decisores;
- Defuzzificações aplicando o método do centro da área nas matrizes das médias *fuzzy* das alternativas, estruturadas com base no *Best Non-fuzzy Performance*, para obter a matriz de alternativas defuzzificada;
- Normalização da matriz de alternativas defuzzificada obtendo a matriz de alternativas defuzzificada e normalizada, usando a Eq. 3.8:

$$\bar{d}_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{i=1}^m d_{ij}} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (3.8)$$

- Cálculo da matriz de decisão defuzzificada, normalizada e ponderada, multiplicando os pesos normalizados pela matriz de alternativas defuzzificada e normalizada, usando a Eq. 3.9:

$$\hat{d}_{ij} = \bar{d}_{ij} \times q_j \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (3.9)$$

- Cálculos das somas P_j para cada alternativa de benefícios da matriz de decisão defuzzificada normalizada, por serem preferíveis em uma otimização de maximização, usando a Eq. 3.10:

$$P_i = \sum_{j=1}^l \hat{d}_{ij} \quad (3.10)$$

Onde: l é o número de critérios que devem ser maximizados.

- Cálculos das somas R_i para cada alternativa de custos da matriz de decisão defuzzificada normalizada, por serem preferíveis em uma otimização de minimização, usando a Eq. 3.11:

$$R_i = \sum_{j=l}^m \hat{d}_{ij} \quad (3.11)$$

Onde $(m - l)$ é o número de critérios que devem ser minimizados.

- Cálculos dos pesos relativos das alternativas de projeto Q_i , usando a Eq. 3.12:

$$Q_i = P_i + \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{R_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (3.12)$$

- Identificação do critério de otimização K , igual ao máximo Q_i (Q_{max})
- Definição das prioridades das alternativas do projeto, considerando que quanto maior o peso relativo de uma alternativa Q_i , maior a sua prioridade no projeto, assim a alternativa com peso relativo Q_{max} será a de grau de satisfação mais alto;
- Calcula-se o grau de utilidade N_j de 0% a 100% para as alternativas, comparando cada alternativa com a alternativa mais eficiente Q_{max} que apresenta grau de utilidade igual a 100%, sendo assim possível avaliar até que ponto uma alternativa é melhor ou pior do que outras alternativas:

$$N_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} 100\% \quad (3.13)$$

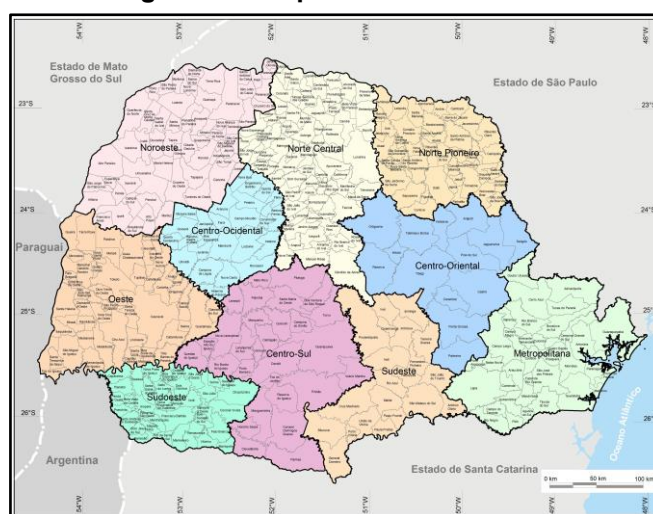
Onde Q_i e Q_{max} são pesos relativos das alternativas do projeto em avaliação. Com o aumento ou diminuição da prioridade da alternativa analisada, seu grau de utilidade também aumenta ou diminui.

4 APLICAÇÃO SIG-MCDM

4.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Trata-se de um problema de localização de sites para usinas fotovoltaicas no Estado do Paraná no Sul do Brasil, que faz divisa com Santa Catarina, São Paulo e Mato Grosso do Sul (Figura 12).

Figura 12 - Mapa do Estado Paraná



Fonte: IPARDES (2019)

Com o objetivo de selecionar e ordenar alternativas de sites para localização de usinas fotovoltaicas escolheu-se o Estado do Paraná por estar dividido em 10 mesorregiões com heterogeneidades geográficas, técnico-econômicas e socioambientais entre seus 399 municípios ocupando uma área de 199.307,922 km² com uma população estimada de 11.348.937 habitantes (IBGE), dos quais 335 municípios com população inferior a 30000 habitantes, com fortes atividades agroindustriais e dispendo de uma malha de distribuição de energia com subestações majoritariamente de 34.5/13.8 kV, ideal para conexões de minicentrals fotovoltaicas distribuídas e ainda considerando a partir da literatura que os modelos:

- SIG-MCDM aplicam subcritérios geográficos para localização de alternativas de sites de energias renováveis normalmente em regiões

áridas, semiáridas, ou isoladas, caracterizadas muitas vezes por uma maior homogeneidade econômica, social e ambiental;

- MCDM aplicam subcritérios empresariais no planejamento energético geral de energias renováveis em regiões normalmente caracterizadas por uma heterogeneidade econômica, social e ambiental.

Definiu-se pela aplicação de um modelo SIG-MCDM utilizando subcritérios geográficos para selecionar e subcritérios empresariais para ordenar alternativas de sites para localização de usinas fotovoltaicas, eliminando limitações e priorizando forças de cada conjunto de subcritérios.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS *STAKEHOLDERS*

Identificou-se um grupo de dez *stakeholders* com formação prioritariamente em engenharia, de ambos os sexos, com 20 a 35 anos de experiência em nível tático e estratégico de empresas nacionais e multinacionais de grande porte com vivência em contratos e projetos estatais, principalmente do setor de energia, os quais representassem interesses do governo, investidores e da sociedade. O grupo era formado por:

- Dois engenheiros e duas engenheiras da superintendência de distribuição de energia de uma empresa concessionária de energia, com experiência técnico-econômica e socioambiental e uma visão alinhada aos interesses do governo e dos investidores, porém com baixíssima disponibilidade de tempo;
- Quatro engenheiros com perfis gerenciais de três empresas multinacionais fornecedoras de equipamentos e serviços do setor de energia, com experiência técnico-econômica e uma visão alinhada aos interesses das indústrias fornecedoras privadas;
- Assistente social do estado com uma visão alinhada aos interesses do governo e da sociedade;

- Engenheira de diretoria de indústria química, com experiência administrativa e técnica, com uma visão alinhada aos interesses ambientais.

4.3 IDENTIFICAÇÃO E GERAÇÃO DE MAPAS DE SUBCRITÉRIOS E RESTRIÇÕES GEOGRÁFICAS

Identificação executada a partir da literatura e levando em conta a disponibilidade de dados em instituições governamentais relativas aos mapas de subcritérios geográficos de irradiação global horizontal (GHI), temperatura média local, distância de rodovias, aspecto e declividade do solo (Tabela 6) e relativa aos mapas de restrições geográficas de uso e cobertura do solo, unidades de conservação e distância de vilas e cidades (Tabela 7).

Tabela 6 - Mapas de critérios e subcritérios geográficos

Critério	Subcritério	Instituições	Literatura
Clima	Irradiação global horizontal (GHI) - 2017	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)	Anwarzai e Nagasaka (2017); Beltrán et al. (2014); Castillo et al. (2016); Sabo et al. (2016); Tahri et al. (2015); Zoghi et al. (2017).
	Temperatura - 2018	Sistema Meteorológico do Paraná - SIMEPAR	Azizkhani et al. (2017); Mussard (2017); Tahri et al. (2015).
Geomorfologia	Aspecto - 2008	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - Shuttle Radar Topography Mission (STRM)	Castillo et al. (2016); Lozano et al. (2013); McKenney et al. (2008); Tahri et al. (2015); Uyan (2013).
	Declividade - 2008	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - Shuttle Radar Topography Mission (STRM)	Aydin et al. (2013); Azizkhani et al. (2017); Castillo et al. (2016); Gunderson et al. (2015); Lozano et al. (2013); Potić et al. (2016); Sabo et al. (2016); Tahri et al. (2015); Uyan (2013); Wang et al. (2016); Zoghi et al. (2017).
Localização	Distância de rodovias - 2016	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT	Anwarzai e Nagasaka (2017); Beltrán et al. (2014); Castillo et al. (2016); Gunderson et al. (2015); Sabo et al. (2016); Tahri et al. (2015); Uyan (2013); Zoghi et al. (2017).

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 7 - Mapas de restrições geográficas

Critério	Restrições	Instituições	Literatura
Uso da terra	Uso e cobertura do solo - 2012	Plataforma MapBiomias	Castillo et al. (2016); Lozano et al. (2013); Potić et al. (2016); Tahri et al. (2015); Uyan (2013) - Wang et al. (2016).
	Unidades de conservação - 2018	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMbio), Instituto Ambiental do Paraná (IAP)	Anwarzai e Nagasaka (2017); Aydin et al. (2013); Castillo et al. (2016); Gunderson et al. (2015); Uyan (2013) - Zoghi et al. (2017).
Localização	Distância de vilas e cidades - 2017	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE	Anwarzai e Nagasaka (2017); Aydin et al. (2013); Castillo et al. (2016); Gunderson et al. (2015); Tahri et al. (2013); Uyan (2013); Zoghi et al. (2017).

Fonte: O Autor (2019)

Na sequência, desenvolveu-se o processo de modelagem cartográfica dos mapas de subcritérios e restrições geográficas detalhado em Albanski (2018):

- Aplicou-se o *datum* Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000 (SIRGAS 2000) com a resolução de 100 m, a mais compatível com as resoluções considerando todos os mapas de subcritérios e restrições geográficas, gerando 19.930.792,2 de áreas de 10000 m² por mapa, equivalente a uma fração importante de área mínima rural legalmente comercializável, que é de 20000 m² ou 30000 m² na maioria dos municípios, sendo 20000 m² mais do que suficiente para geração de 1 MW, ocupando aproximadamente 70% da área ou 14000 m²;
- Converteram-se os mapas para a projeção *Albers Equal Area Conic*, devido à grande extensão Leste-Oeste do Paraná, que abrange dois fusos horários, de forma a evitar deformações e manter as características espaciais das áreas;
- Calculou-se a escala aproximada de 1: 2.500.000 dos mapas dividindo os 647 km de leste a oeste do estado por 27,5 cm de largura da folha A3.

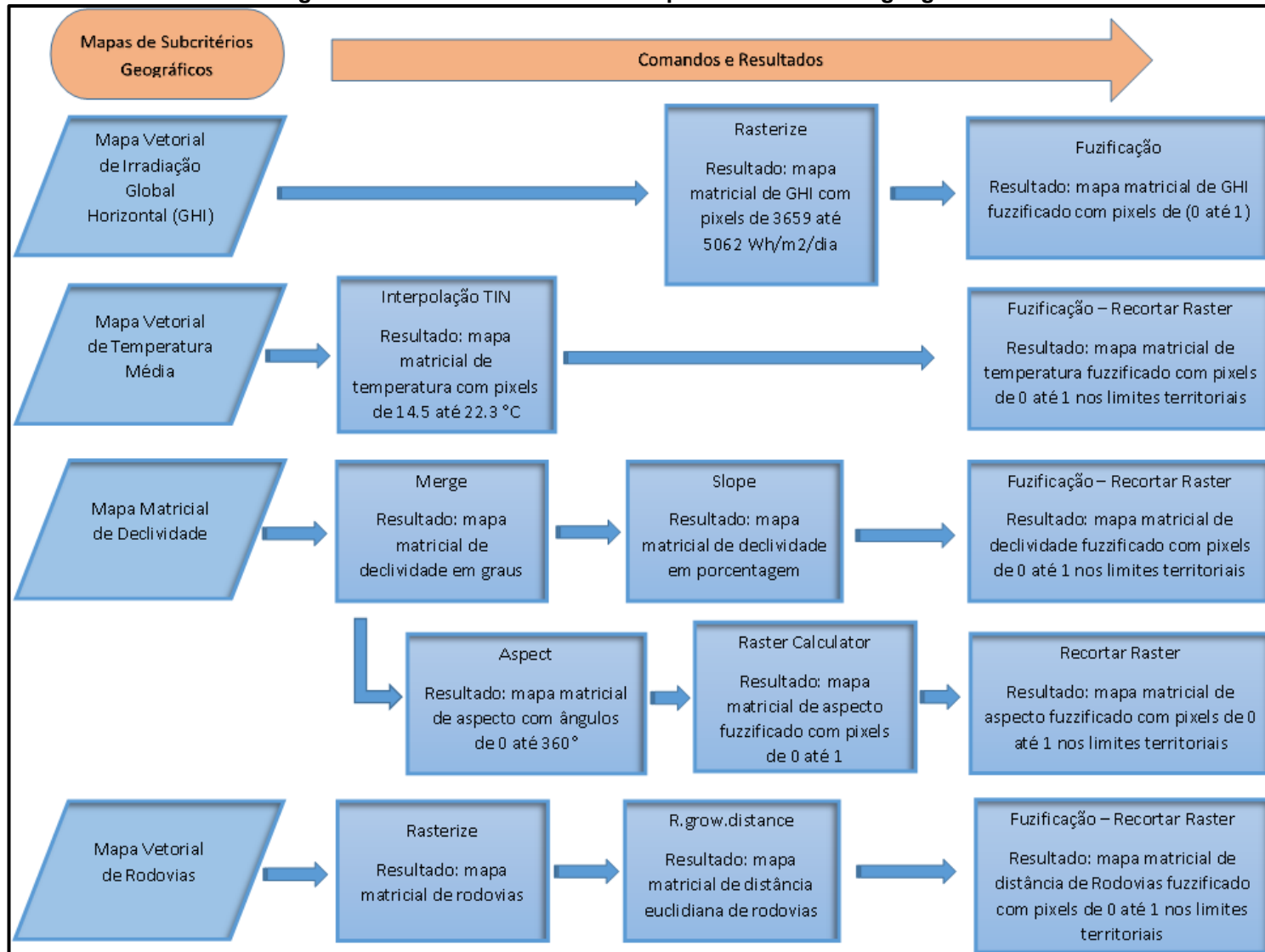
4.4 IDENTIFICAÇÃO DE ALTERNATIVAS GEOGRÁFICAS DE SITES

Segue o processo de identificação de alternativas geográficas de sites obtidos a partir de um mapa de índice de adequação geográfico máximo, elaborado através de simulações da álgebra de mapas rasterizados e fuzzificados de subcritérios geográficos com a eliminação de restrições geográficas *crisp*.

4.4.1 Rasterização dos Mapas de Subcritérios e Restrições Geográficas

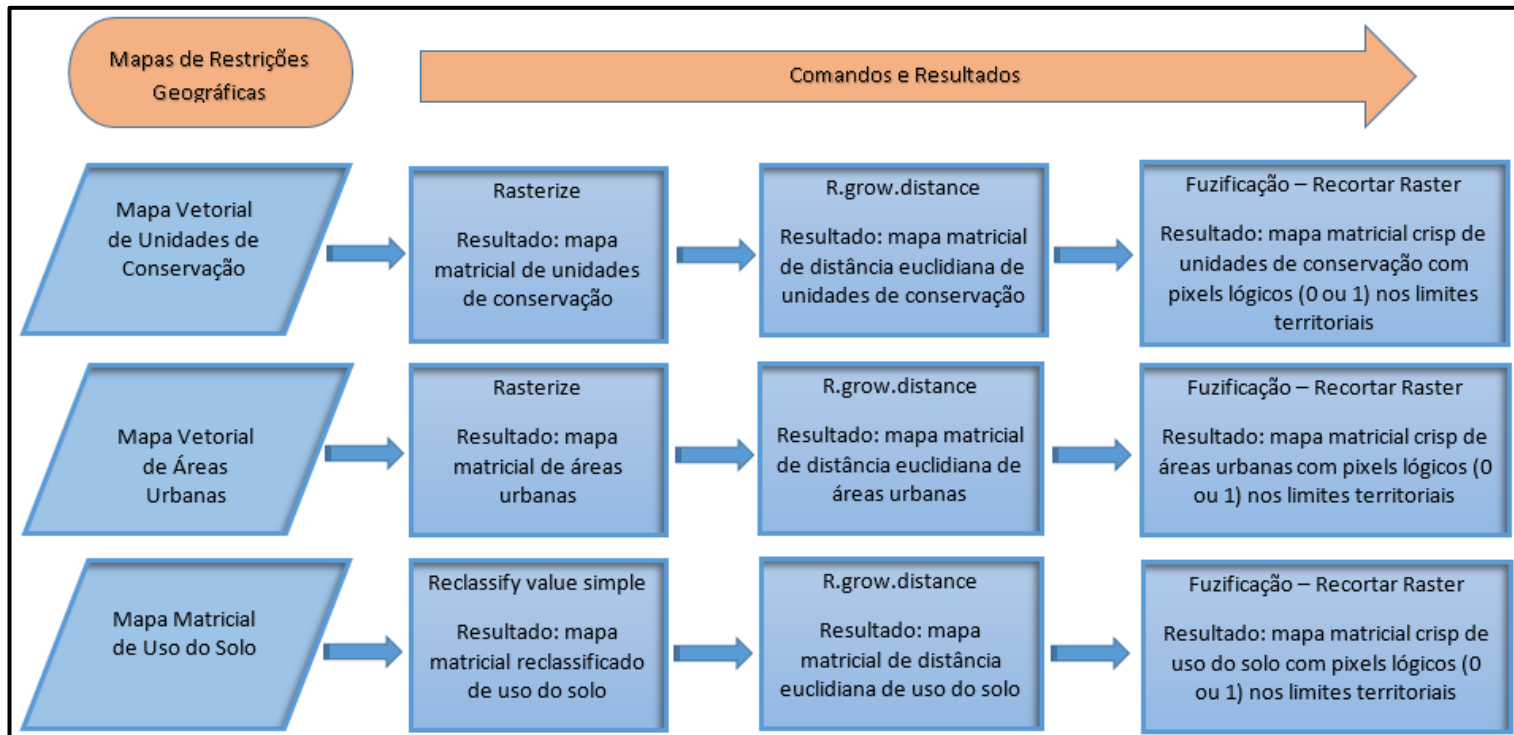
Visando obter os mapas no formato matricial ou *raster*, os mapas de subcritérios e restrições geográficas do Estado do Paraná após modelados (ALBANSKI, 2018) foram submetidos a uma série de processamentos no sistema de informação geográfica QGIS, detalhados nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 - Processamentos dos mapas de subcritérios geográficos



Fonte: O Autor (2019)

Figura 14 - Processamentos dos mapas de restrições geográficas



Fonte: O Autor (2019)

Com relação a qualidade dos dados e aos processamentos apresentados nas Figuras 13 e 14 é importante detalhar alguns aspectos:

- O mapa vetorial de irradiação global horizontal com medidas de incidência de energia solar foi coletado do Atlas Solar do Paraná, apresentando uma variabilidade de 3.6 KWh/m²/dia a 5.1 KWh/m²/dia, porém devido a sua baixa resolução de 10 Km foi reamostrado para 100 m;
- O mapa vetorial de temperatura apresentando temperaturas médias entre 14,5 °C e 22,3 °C foi coletado a partir de interpolação de dados de 40 estações meteorológicas georreferenciadas da SIMEPAR;
- O mapa raster de declividade referente à inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal, cujos valores ideais para instalação de plantas fotovoltaicas estão na faixa de 0% a 5% de declividade, foi coletado diretamente do Modelo Digital de Elevação (MDE) do Banco de Dados Geomorfométrico do Brasil (TOPODATA), sendo estruturado a partir de um merge de mosaicos de mapas;
- O mapa raster de aspecto do solo foi coletado a partir do mapa *raster* de declividade em graus, sendo ideal no hemisfério sul, a orientação dos painéis fotovoltaicos em direção ao norte visando receber a máxima quantidade de energia solar;
- O mapa *raster* de uso do solo teve seus pixels reclassificados com "Nota" igual a 0 para áreas de uso não permitido (florestas naturais e plantadas, formações florestais e de savanas, mangue, praias e dunas, corpos d'água, infraestrutura urbana, ...) e igual a 1 para áreas de uso permitidas (formações naturais e áreas não florestais, vegetação campestre, pastagens, uso agropecuário, agrícola e de pastagens, ...);
- Os mapas vetoriais de unidades de conservação e áreas urbanas foram rasterizados com atributo "Nota" igual a 0 para unidades de conservação (florestais e de reflorestamentos) e áreas urbanas (vilas e cidades) e "Nota" igual a 1 para demais áreas.

4.4.2 Fuzzificação dos Mapas de Subcritérios e Restrições Geográficas

Executou-se na sequência a fuzzificação dos mapas *rasters* dos subcritérios e restrições geográficas do Paraná, aplicando:

- Funções de pertinências lineares dos mapas de subcritérios geográficos, com parametrização dos limites a, b, c, d, considerando os valores das variáveis físicas geográficas e as referências de valores da literatura (Tabela 8);
- Conjuntos *crisp* dos mapas de restrições geográficas, com parametrização dos limites das máscaras lógicas, considerando os valores das variáveis físicas geográficas e as referências de valores da literatura (Tabela 9).

Tabela 8 - Funções de pertinência

Subcritérios	Funções fuzzy	Parâmetros das funções fuzzy			
		a	b	c	d
Irradiação global horizontal (GHI)	Linear crescente	1 kWh/m ² /d	5 kWh/m ² /d	5 kWh/m ² /dia	5 kWh/m ² /dia
Temperatura	Linear decrescente	-5°C	-5°C	-5°C	45°C
Aspecto	Linear simétrica (Triangular)	W, N (270° - 0°)	N (0°)	N (0°)	N, E (0° - 90°)
Declividade	Linear decrescente	3%	3%	3%	5%
Distância de rodovias	Linear decrescente	5 Km	5 Km	5 Km	15 Km

Linear crescente

Linear simétrica

Linear decrescente

Fonte: O Autor (2019)

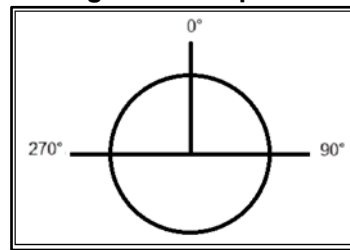
Tabela 9 - Funções *crisp*

Restrições	Máscara lógica	Funções <i>crisp</i>	
		Valor lógico 0	Valor lógico
Uso e cobertura da terra	(On/Off)	≤ 5 Km	> 5 Km
Unidades de conservação	(On/Off)	≤ 5 Km	> 5 Km
Distância de vilas e cidades	(On/Off)	≤ 1 Km	> 1 Km

Fonte: O Autor (2019)

Deve-se ater ao processo de fuzzificação do mapa *raster* do subcritério geográfico de aspecto, no qual se aplicou uma função de pertinência triangular desenvolvida a partir da Figura 15, utilizando a calculadora raster ao calcular a Eq. 4.1 de ângulos trigonométricos.

Figura 15 - Aspecto



Fonte: Autor, 2019

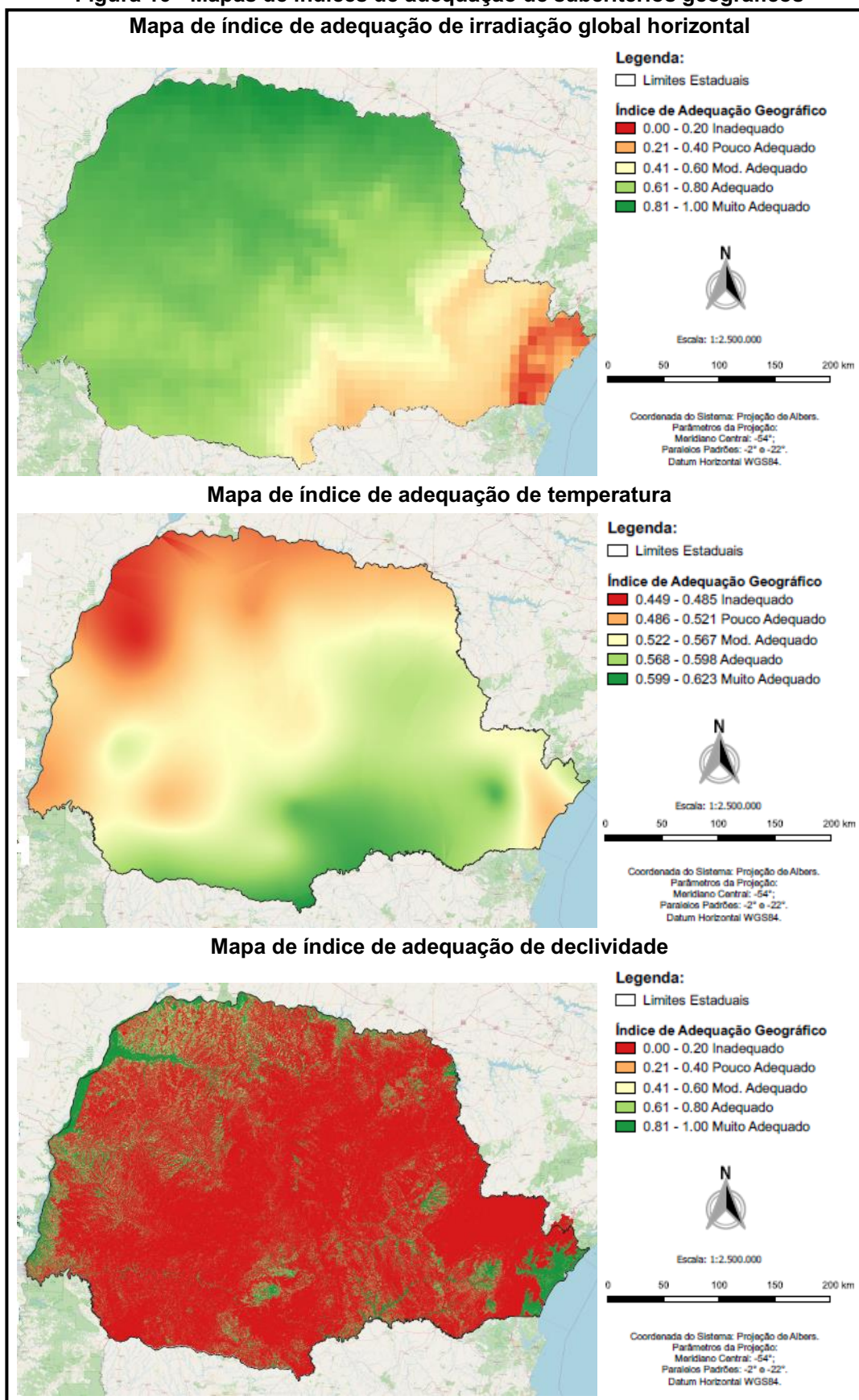
$$\begin{aligned}
 & (("Aspecto_Albers@1" > 90) \text{ AND } ("Aspecto_Albers@1" < 270)) * 0 + \\
 & (("Aspecto_Albers@1" >= 0) \text{ AND } ("Aspecto_Albers@1" <= 90)) * (1 - \\
 & "Aspecto_Albers@1" / 90) + (("Aspecto_Albers@1" >= 270) \text{ AND } \\
 & ("Aspecto_Albers@1" <= 360)) * ("Aspecto_Albers@1" / 90 - 3).
 \end{aligned}$$

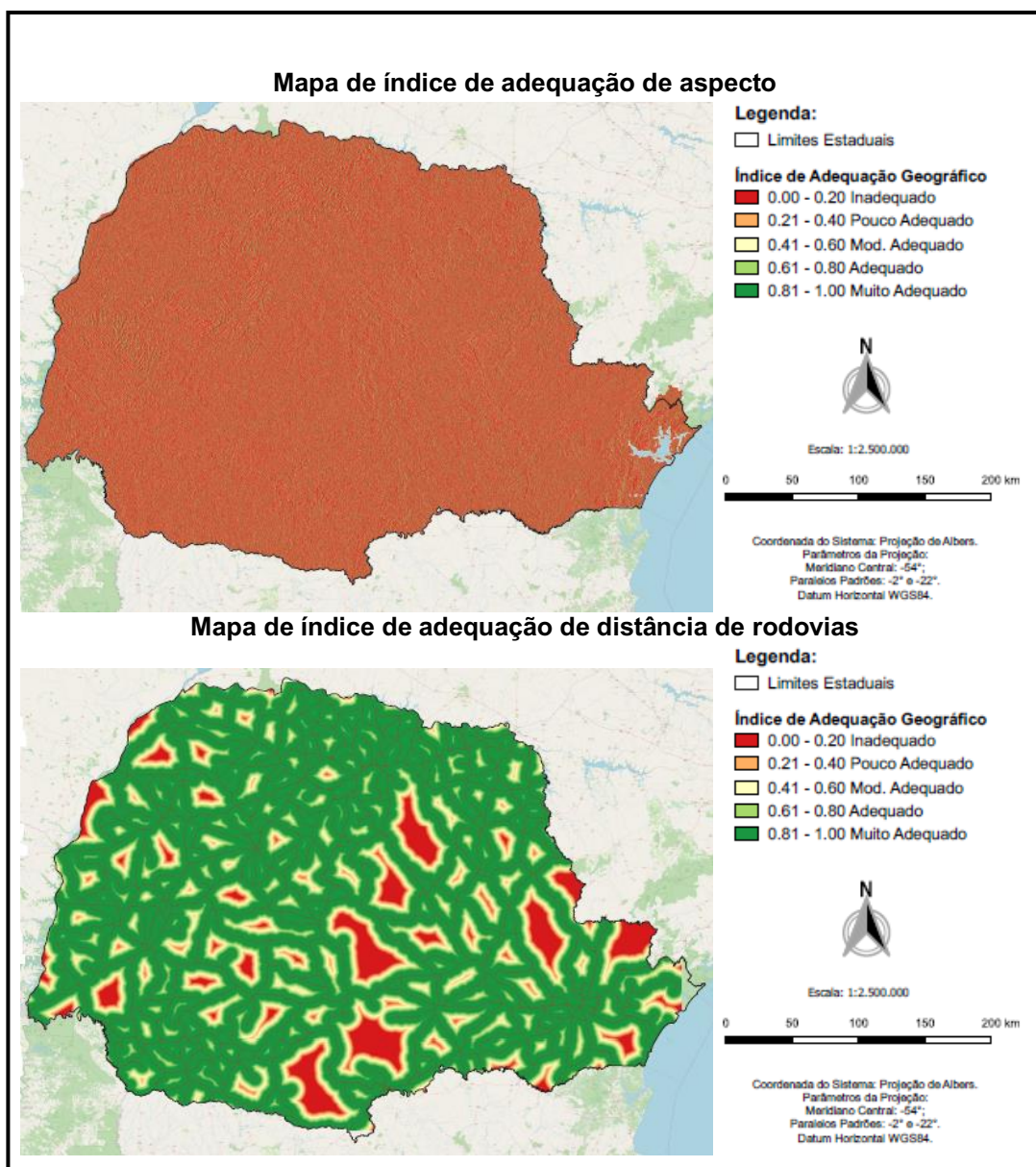
(4.1)

Após os processos de rasterização e fuzzificação no software Quantum GIS (QGIS), foram obtidos os seguintes mapas *fuzzy* e *crisp*, denominados de mapas de índices de adequação de subcritérios e de restrições geográficas:

- Mapas de índices de adequação de subcritérios de irradiação, temperatura, declividade, aspecto e distância de rodovias com 19.930.792 pixels e graus de pertinência entre 0 e 1, rerepresentando os índices de adequação categorizados proporcionalmente entre inadequado a muito adequado para as alternativas sites (Figura 16);
- Mapas de índices de adequação de restrições geográficas de unidades de conservação, uso do solo e distância de cidades e vilas com 19.930.792 pixels e graus de pertinência 0 ou 1, representando os índices de adequação lógico 0 para inadequado e 1 para adequado para as alternativas sites (Figura 17).

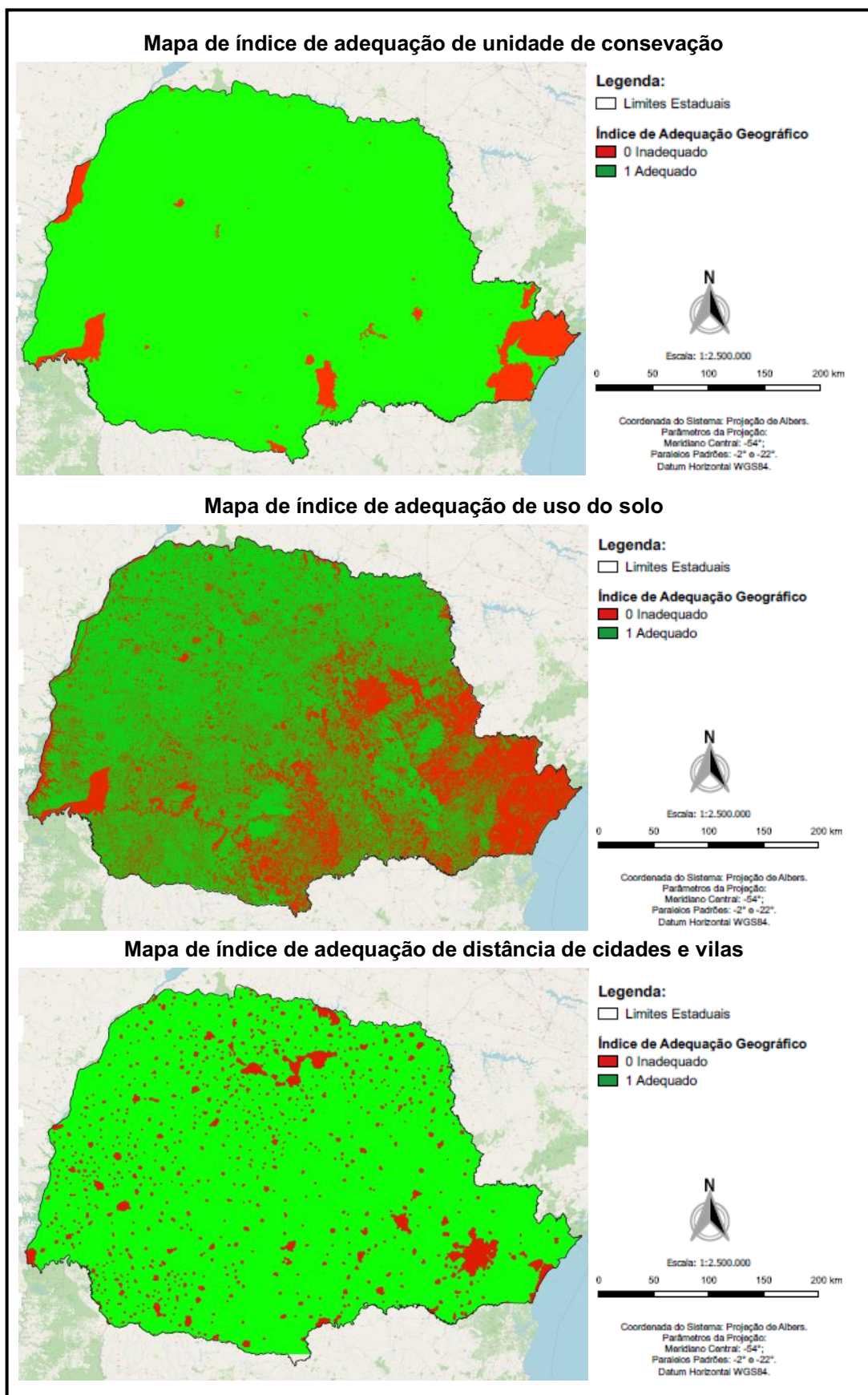
Figura 16 - Mapas de índices de adequação de subcritérios geográficos





Fonte: O Autor - QGIS (2019)

Figura 17 - Mapas de índices de adequação de restrições geográficas



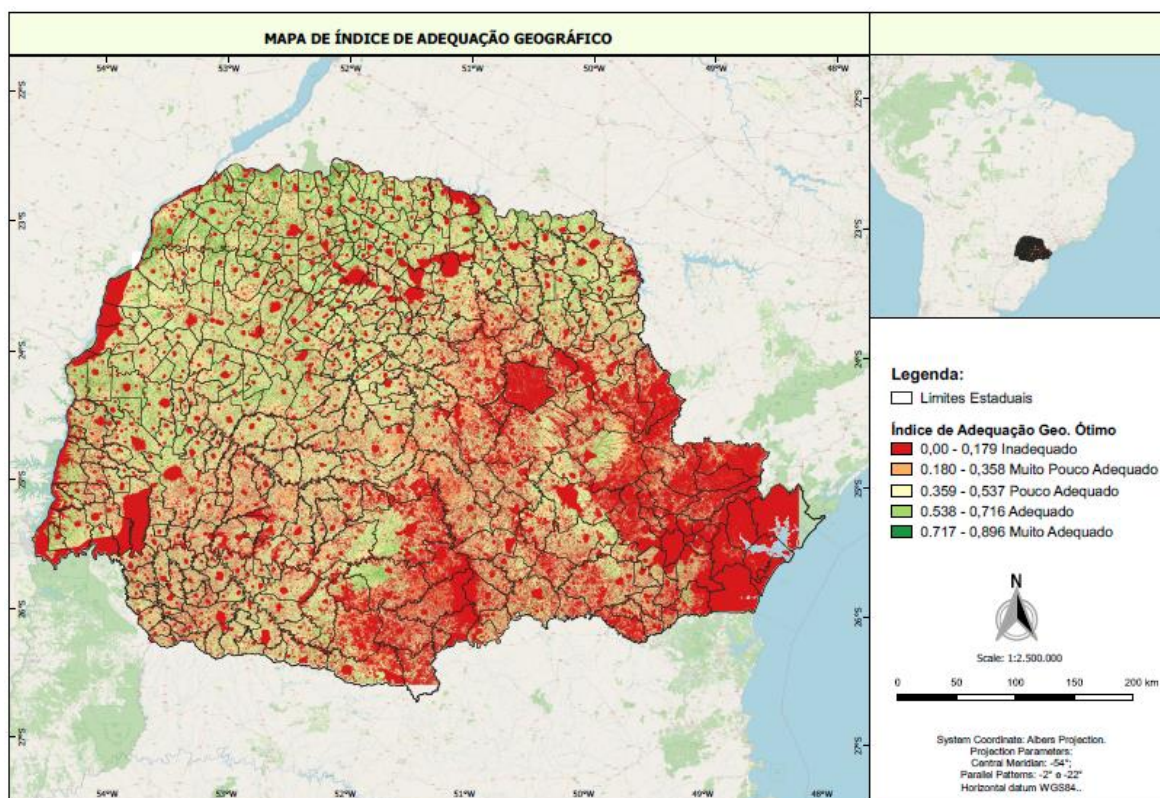
Fonte: O Autor - QGIS (2019)

4.4.3 Álgebra dos Mapas de Índices de Adequação Geográfico

Executou-se a álgebra de mapas de índices de adequação de subcritérios geográficos na calculadora de *rasters* do QGIS, através da soma ponderada pelo método MCDM *Weighted Linear Combination* (WLC) com pesos iguais (WANDERER; HERLE, 2015).

Eliminou-se as áreas restritivas dos mapas de índices de adequação de subcritérios através de *AND* com os mapas de índices de adequação de restrições geográficas, obtendo o mapa de índice de adequação geográfico do Estado do Paraná (Figura 18) com grau máximo de pertinência ou de índice de adequação de 0,896.

Figura 18 - Mapa de índice de adequação geográfico



Fonte: O Autor (2019)

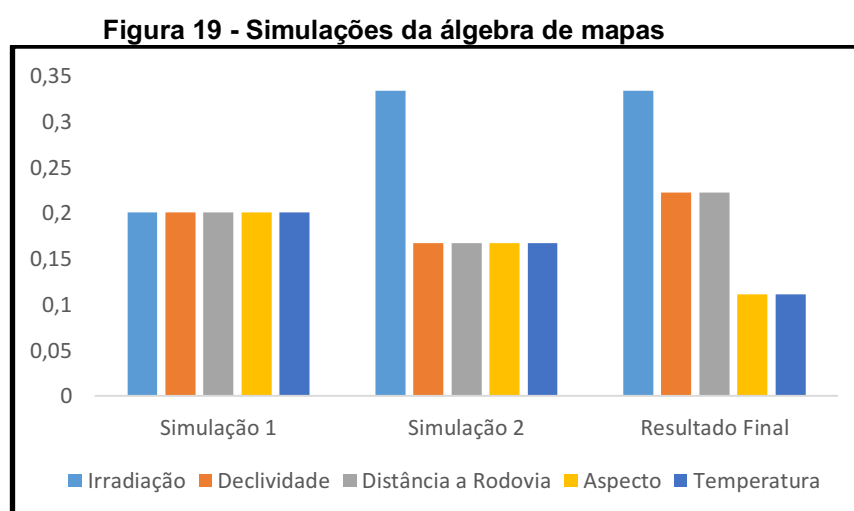
4.4.4 Mapa de Índice de Adequação Geográfico Máximo

Em função da aplicação de pesos iguais ao obter o mapa de índice de adequação de geográfico e com o intuito de maximizar e obter um mapa de índice de adequação geográfico máximo, aplicou-se a técnica de WMPDP com base em

simulações sucessivas de saturação de graus de pertinência dos pixels a partir do conceito de análise de sensibilidade.

Para aplicação da técnica WMPDP foram executadas com base na Equação 3.1 e nos procedimentos da Figura 5 - Técnica WMPDP, as seguintes simulações da álgebra de mapas, conforme ilustrado na Figura 19:

- Simulação 1, executou-se com pesos idênticos e normalizados a álgebra dos mapas de índices de adequação de subcritérios geográficos obtendo o mapa de índice de adequação geográfico;
- Simulação 2, iniciou-se com o mapa de índice de adequação geográfico, incrementando o peso do mapa de índice de adequação do subcritério de irradiação, decrementando igualmente os pesos dos demais mapas de índices de adequação de subcritérios geográficos até a saturação do maior grau de pertinência *fuzzy* do mapa de índice de adequação geográfico simulado, obtendo o peso de valor 0,333 para irradiação;
- Simulação do resultado final, repetiu-se os procedimentos da simulação 2 para declividade, distância a rodovias, aspecto e a temperatura, obtendo o mapa de índice de adequação geográfico máximo (Figura 20) com os pesos normalizados de irradiação (0,333), de declividade e distância de rodovias (0,222), aspecto e temperatura (0,111).

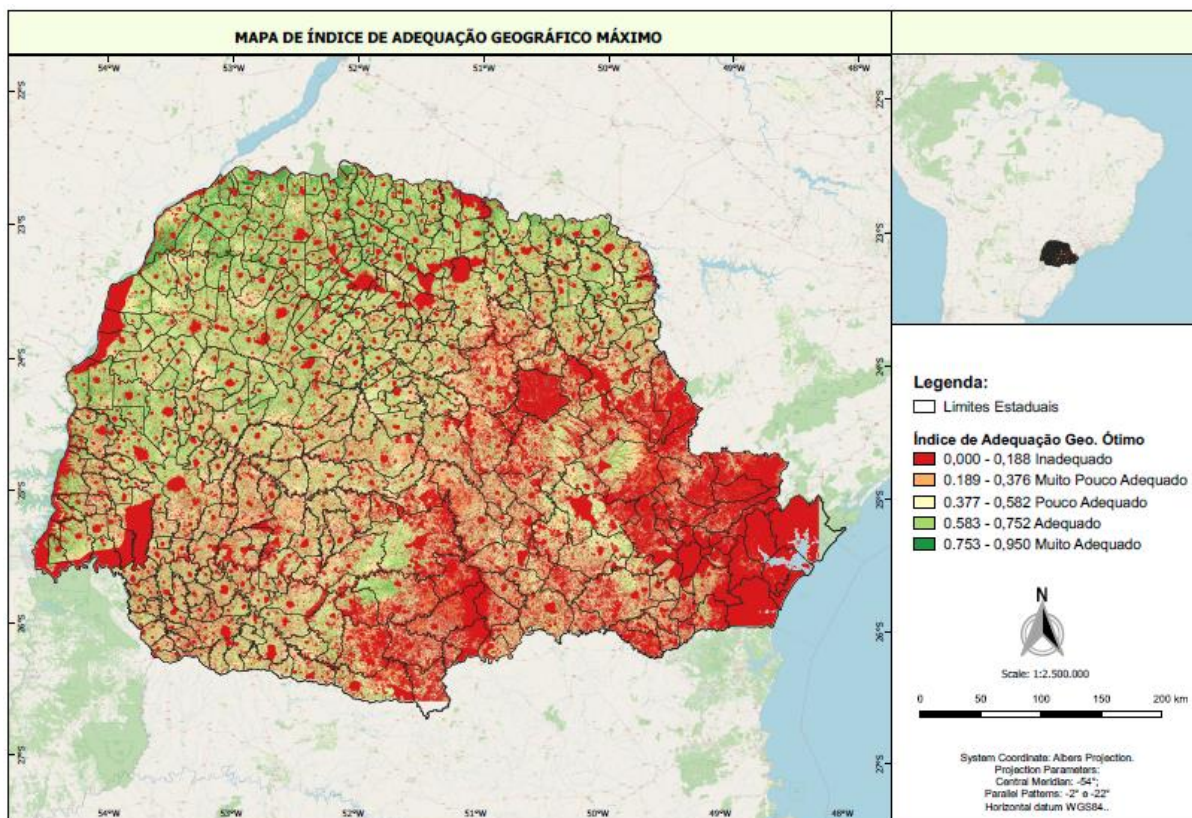


Fonte: O Autor (2019)

O mapa de índice de adequação geográfico máximo (Figura 20) obtido com pesos calculados pela técnica WMPDP apresenta grau máximo de pertinência de

0,95, superior ao 0,896 do mapa de índice de adequação geográfico obtido com pesos idênticos, refletido melhor a influência das variáveis físicas do ambiente geográfico e mostrando que a região é adequada para instalação de usinas fotovoltaicas em grande parte de seu território, sendo 22,3% da região inadequada, 3,6% muito pouco adequada, 25,1% pouco adequada, 36,4% adequada e 12,6% muito adequada.

Figura 20 - Mapa de índice de adequação geográfico máximo



Fonte: O Autor (2019)

Outro aspecto importante do mapa de índice de adequação geográfico máximo é que os índices de adequação de inadequado a muito adequado, são funções de pertinência lineares das grandezas físicas geográficas de irradiação (3.6 KWh/m²/dia a 5.1 KWh/m²/dia) temperatura (14,5 °C e 22,3 °C), declividade (0% a 5%), aspecto (Oeste-Norte-Leste) e distância de cidades e vilas (0 Km a 15 km).

A partir do mapa de índice de adequação geográfico máximo identificou-se os melhores sites para instalação de usinas fotovoltaicas em termos de critérios geográficos e com o intuito de ordenar em termos de critérios empresariais, considerou-se a importância da existência de heterogeneidades econômicas e

socioambientais, o que levou a selecionar 10 sites, um de cada uma das 10 mesorregiões paranaense.

Selecionou-se os 10 sites com os melhores índices de adequação (Tabela 10) em sua mesorregião ao lado de estradas pavimentadas, com a ferramenta de estatísticas zonais do QGIS aplicada ao mapa de índice de adequação geográfico máximo, com estatísticas geradas na tabela de atributos de um mapa vetorial de municípios paranaenses com posterior visualização dos sites no *Google Maps* diretamente no QGIS.

Tabela 10 - SIG ranking

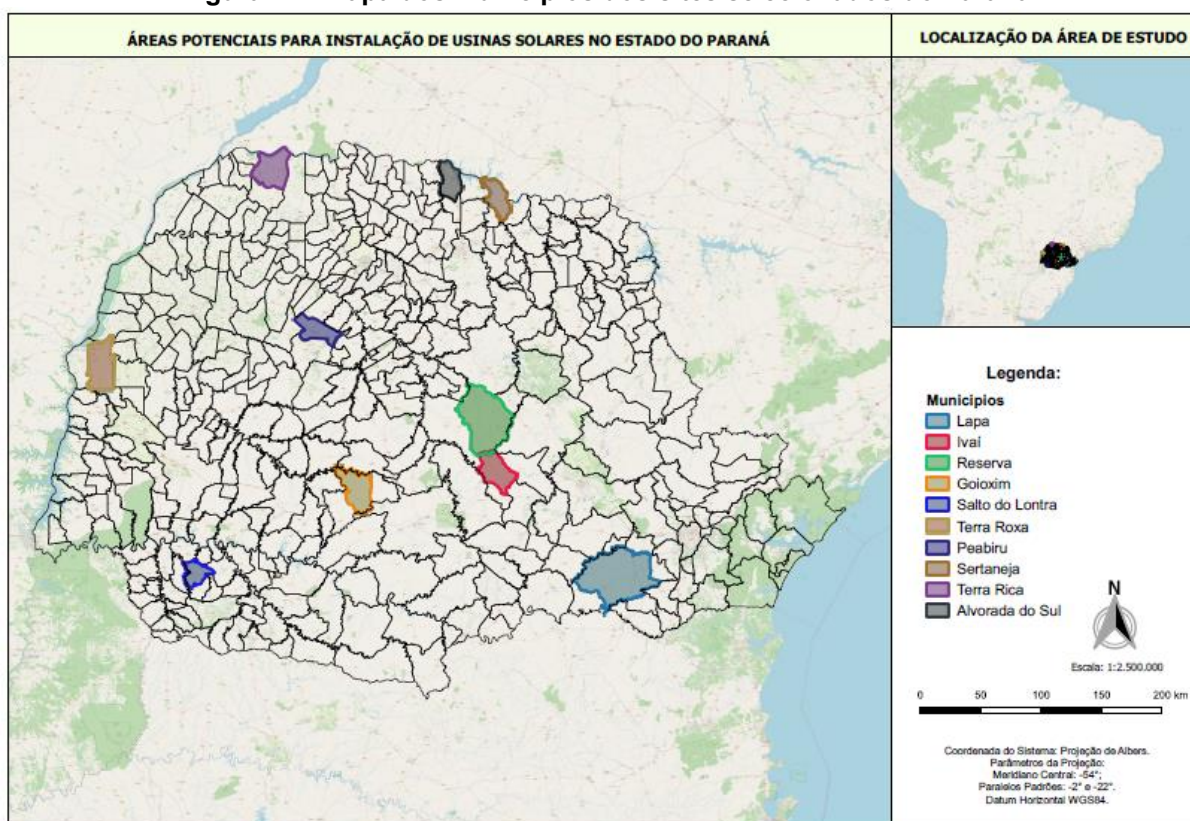
	RANKING									
	Alternativas									
	Peabiru	Reserva	Goioxim	Lapa	Terra Rica	Alvorada do Sul	Sertaneja	Terra Roxa	Ivaí	Salto do Lontra
Geração de energia (MW)	5	3	1	1	3	4	5	1	3	3
Índice de adequação Geográfico	0,91	0,85	0,86	0,75	0,95	0,94	0,93	0,9	0,83	0,89
Ranking	4	8	7	10	1	2	3	5	9	6

Fonte: O Autor - SIG (2019)

Os 10 sites selecionados apresentam além das características geográficas de alta irradiação solar, baixa declividade, face orientada mais para o norte e temperaturas médias anuais amena:

- Localização em regiões rurais de pequenos municípios com população de 10000 a 50000 habitantes (Figura 21) garantindo demanda para minicentrais fotovoltaicas durante o horário diurno;
- Acesso por estradas estaduais pavimentadas com rede de energia elétrica com linhas de distribuição de 13.8 kV ou 34,5 kV conectadas a subestações de média tensão de 34,5 kV / 13.8 kV com 15 KVA de potência;
- Áreas de 20000 m² a 100000 m², excelentes para minicentrais fotovoltaicas, que ocupam aproximadamente 14.000 m² para geração de 1 MW com base em 70% de fator de ocupação de área, possibilitando geração de 1 MW a 5 MW com investimentos da ordem de R\$ 5.000.000,00 por MW, totalmente acessíveis ao agronegócio.

Figura 21 - Mapa dos municípios dos sites selecionados do Paraná



Fonte: O Autor (2019)

4.5 IDENTIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS EMPRESARIAIS

Identificou-se um conjunto de critérios empresariais sustentáveis com respectivos subcritérios a partir da literatura e de uso cotidiano em tomadas de decisão de empreendimentos de energia. Submeteu-se ao grupo de *stakeholders* consultas sobre aplicação destes critérios e subcritérios empresariais antes das pesquisas, obtendo os subcritérios empresariais (Tabela 11) aplicados nos métodos MCDM. Durante este processo:

- Os subcritérios econômicos de custo presente líquido e custo-benefício, foram eliminados devido a necessidade de extensos e complexos estudos de viabilidade econômica para cada alternativa de local, além da disponibilidade limitada de dados públicos nacionais para projetos de pequeno porte envolvendo minicentrals fotovoltaicas;
- O subcritério técnico de eficiência de geração líquida foi eliminado por apresentar cálculos com previsões futuras muito imprecisas, já o subcritério

técnico de fator de disponibilidade anual foi substituído pela duração de interrupção por unidade consumidora (DEC), por disponibilizar valores no banco de dados de acesso público da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) relativos aos municípios onde se localizam as alternativas de sites selecionadas no SIG;

- Os subcritérios técnicos de confiabilidade, maturidade e segurança da tecnologia solar foram eliminados devido a estes tipos de subcritérios serem mais usuais na seleção entre diferentes fontes de energia (solar, eólica, nuclear, ...), considerando também que o subcritério duração de interrupção por unidade consumidora (DEC) já contempla as falhas das linhas de distribuição e das subestações de energia de média tensão dos municípios onde se localizam as alternativas de sites selecionadas no SIG;
- Os subcritérios de riscos políticos e jurídicos foram eliminados por se tratarem dos mesmos, antigos riscos políticos e jurídicos já conhecidos pelos investidores, considerando também que estes subcritérios de riscos são majoritariamente de uso internacional e que não se aplicavam em empreendimentos de pequeno porte, voltados para investimentos de cooperativas de energia locais, ou produtores independentes, ou concessionárias de energia nacionais.

Os demais subcritérios mantidos (Tabela 11) foram aqueles oriundos da literatura e disponíveis em bancos de dados de acesso público de fonte privada ou pública, ou de cálculo simples e de uso cotidiano nas empresas.

Tabela 11 - Origem dos subcritérios empresariais

Critérios	Subcritérios	Literatura
Econômico	Custo de Investimento	Beltrán et al. (2014); Haddad et al. (2017); Klein e Whalley (2015); La Rovere et al. (2010); Mourmouris e Potolias (2013); Stein (2013); Tsoutsos et al. (2009); Wang JJ et al. (2009); Zhang et al. (2015).
	Payback	Haddad et al. (2017); Wang JJ et al. (2009).
	Período de Construção	La Rovere et al. (2010).
	Custo de Equipe O&M	Haddad et al. (2017); Mourmouris e Potolias (2013); Stein (2013); Wang JJ et al. (2009); Zerpa e Yusta (2015).
Técnico	Potencial de Geração de Energia Elétrica	La Rovere et al. (2010).
	Fator de Capacidade	Haddad et al. (2017); Klein e Whalley (2015); Maxim (2014); Stein (2013); Zerpa e Yusta (2015).
	Duração equivalente de interrupção (DEC)	Mourmouris e Potolias (2013); Grossmann et al. (2014).
Ambiental	Emissão mensal de CO ₂ no transporte	Castillo et al. (2016); Klein e Whalley (2015); La Rovere et al. (2010); Mourmouris e Potolias (2013); Onat e Bayar (2010); Stein (2013); Zerpa e Yusta (2015); Zhang et al. (2015).
	Descarte de placas fotovoltaicas	Klein e Whalley (2015); Mourmouris e Potolias (2013); Wang JJ et al. (2009).
Social	Quantidade de empregos sazonais	Stein (2013); Zerpa e Yusta (2015); Wang JJ et al. (2009); Zhang et al. (2015).
	Quantidade de empregos permanentes	Stein (2013); Zerpa e Yusta (2015); Wang JJ et al. (2009); Zhang et al. (2015).
	População Beneficiada	Haddad et al. (2017); Klein e Whalley (2015); La Rovere et al. (2010); Maxim (2014); Mourmouris e Potolias (2013); Wang JJ et al. (2009); Zerpa e Yusta (2015); Zhang et al. (2015).

Fonte: O Autor (2019)

4.6 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Seguem as aplicações dos métodos de tomada de decisão multicritério SWARA-SAW e COPRAS-F.

4.6.1 Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis - Weighted Sum Method

Aplicou-se junto aos 4 *stakeholders* com perfil de tomadores de decisão e representantes dos investidores, fornecida a matriz de consequência, as pesquisas de classificação de importância e de importância relativa entre critérios e entre subcritérios relativas ao SWARA.

a) Pesquisa de classificação de importância de critérios e subcritérios:

Aplicou-se junto aos 4 *stakeholders* com perfil de tomadores de decisão e representantes de investidores, oriundos da concessionária de energia, uma pesquisa de classificação de importância de critérios e subcritérios empresariais, conforme mostrado no Quadro 1, onde também se encontram as definições técnicas dos subcritérios, utilizou-se scores na classificação de importância do menos importante com score 1 ao mais importante com score 4.

Os resultados das pesquisas de classificação de importância de critérios foram submetidos a um teste de compatibilidade de julgamento dos decisores com base na tabela qui-quadrado, cujos cálculos e resultados estatísticos são apresentados em Apêndice, com coeficiente de concordância de 0,85, compatibilidade igual a 10 ($> 7,815$ para graus de liberdade igual a 3) e nível de confiança de 95%, demonstrando que a hipótese sobre concordância de opiniões dos decisores foi aceita, validando o ranking de classificações de importância dos critérios.

Cálculos estatísticos idênticos foram efetuados para os subcritérios econômicos, técnicos e sociais, apresentando respectivamente compatibilidades iguais a 8, 7 e 8, demonstrando que a hipótese sobre concordância de opiniões dos decisores foi aceita, validando o ranking de classificações de importância dos critérios.

Apenas se deve ater ao fato que o teste de compatibilidade não foi executado para subcritérios ambientais, pois, não é válido em função do seu grau de liberdade unitário (números de critérios - 1).

Quadro 1 - Pesquisa de Classificação de Importância de Critérios e Subcritérios Empresariais

UTFPR - PESQUISA DE CLASSIFICAÇÃO DE IMPORTÂNCIA DE CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS EMPRESARIAIS					
1) Classifique o critério menos importante com score 1 ao mais importante com score 4.					
Critérios	Classificação dos Critérios	Subcritérios econômicos	Classificação dos Subcritérios	Otimização - Medição	Definições
Econômico	<input type="text"/>	Custo de investimento	<input type="text"/>	Mínimo – R\$	Custos relativos aquisição de terras, terraplenagem, equipamentos, instalações, engenharia, construção de estradas, conexões à rede e trabalhos de construção acidentais, ou seja, custos de construção descontados juros sobre empréstimos e títulos.
		Payback	<input type="text"/>	Mínimo – meses	Refere-se ao período de tempo necessário para recuperar o investimento, mede quanto tempo leva para "pagar por si mesmo".
		Custo de operação e Manutenção	<input type="text"/>	Mínimo – R\$/ano	Salários dos funcionários para a operação e manutenção do sistema de energia.
		Período de construção	<input type="text"/>	Mínimo – meses	Prazo entre início de construção e geração comercial.
Técnico	<input type="text"/>	Potencial de geração de energia elétrica	<input type="text"/>	Máximo – GWh/ano	Cálculo da capacidade de geração de energia anual, ou potencial de fornecimento eletricidade.
		Fator de Capacidade	<input type="text"/>	Máximo – %	Relação entre a geração e a capacidade de geração em um período, sendo associado a confiabilidade relativa a falhas e as condições ambientais locais.
		Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC)	<input type="text"/>	Mínimo – minutos/ano	Indica o número de horas em média que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal.
Ambiental	<input type="text"/>	Emissão Mensal de CO ² no Transporte	<input type="text"/>	Mínimo – Toneladas/mê	Emissões de CO ² , sendo que, instalações fotovoltaicas de grande escala têm implicações relevantes em áreas rurais próximas, também há o impacto a saúde humana e danos aos ecossistemas.
		Descarte de Painéis Solares	<input type="text"/>	Mínimo – Unidades	Perda de vidas humanas com base na avaliação de todas as atividades que compõem o ciclo de vida da usina fotovoltaica, considerando as fases de construção, operação e desativação.
Social	<input type="text"/>	Empregos Sazonais	<input type="text"/>	Máximo – empregados	Criação de empregos sazonais na fase de projeto e construção.
		Empregos Permanentes	<input type="text"/>	Máximo – empregados	Empregos de longo prazo na fase de operação e manutenção
		População Beneficiada	<input type="text"/>	Máximo – residentes	População com prosperidade social durante o ciclo de vida da usina fotovoltaica.

Fonte: O Autor (2019)

Na sequência calculou-se a média dos scores obtidos, estabelecendo a classificação de importância entre os critérios (Tabela 12) e entre os subcritérios: econômicos (Tabela 13), técnicos (Tabela 14), sociais (Tabela 15) e ambientais (Tabela 16), onde o mais importante obteve a média mais alta e o menos importante obteve a média mais baixa.

Tabela 12 - Ranking dos critérios

Ranking				
Tomadores de decisão	C1 Econômico	C2 Técnico	C3 Ambiental	C4 Social
1	3	4	2	1
2	4	3	1	2
3	4	3	1	2
4	4	3	1	2
Média	3,75	3,25	1,25	1,75
Ranking	1	2	4	3

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 13 - Ranking dos critérios econômicos

Ranking				
Tomadores de decisão	C1-1 Custo do investimento	C1-2 Payback	C1-3 Custo de operação e manutenção	C1-4 Período de construção
1	4	3	2	1
2	4	1	2	3
3	4	3	2	2
4	4	3	1	2
Média	4	2,5	1,75	2
Ranking	1	2	4	3

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 14 - Ranking dos subcritérios técnicos

Ranking				
Tomadores de decisão	C2-1 Potencial de geração de energia	C2-2 Fator de capacidade	C2-3 Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC)	
1	2	3	1	
2	3	2	1	
3	3	2	1	
4	3	2	1	
Média	2,75	2,25	1	
Ranking	1	2	3	

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 15 - Ranking dos subcritérios sociais

Ranking			
Tomadores de decisão	C3-1 Empregos sazonais	C3-2 Empregos permanentes	C3-3 População beneficiada
1	1	2	3
2	1	2	3
3	1	2	3
4	1	2	3
Média	1	2	3
Ranking	3	2	1

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 16 - Ranking dos subcritérios ambientais

Tomadores de decisão	Ranking	
	C1 Emissão de CO ² no transporte	C2 Descarte de painéis solares
1	2	1
2	1	2
3	1	2
4	1	2
Média	1,25	1,75
Ranking	2	1

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Durante a pesquisa de classificação de importância entre critérios, houve questionamentos dos pesquisados referente a possíveis incoerências de se aplicar as classificações obtidas pelos critérios na pesquisa de importância relativa entre critérios.

Como um decisor poderia julgar na pesquisa de importância relativa um critério como percentualmente menos importante do que outro critério, se classificou o oposto em termos de importância na pesquisa de classificação de importância.

Para amenizar tais conflitos individuais dos tomadores de decisão optou-se por uma reunião de consenso enquadrando os resultados majoritários da pesquisa de classificação de importância de critérios como uma política estratégica de empresa, facilitando a aplicação da pesquisa de importância relativa de critérios. Deve-se observar que a mesma incoerência se aplica as pesquisas de subcritérios.

b) Pesquisa de importância relativa entre critérios e entre subcritérios:

- Aplicou-se uma pesquisa de importância relativa entre critérios e entre subcritérios empresariais (Apêndice A), onde tomadores de decisão de investidores compararam sucessivamente critérios ou subcritérios menos importantes com mais importantes utilizando a seguinte linguística de importância com equivalente percentual:
 - ✓ Igual importância, corresponde a 0% menos importante;
 - ✓ Pouco menos importante, corresponde a 20% menos importante;
 - ✓ Menos importante, corresponde a 40% menos importante;
 - ✓ Muito menos, importante corresponde a 60% menos importante;
 - ✓ Extremamente menos importante, corresponde a 80% menos importante;

- ✓ Sem importância, corresponde a 100% menos importante;

Segue um exemplo de uma pergunta da pesquisa apresentada integralmente no Apêndice A:

- Com base na “Importância relativa entre critérios” e nas definições abaixo, marque com um “X” a alternativa que você considera a mais apropriada:

- ✓ O critério técnico é _____ critério econômico.

- () a. de igual importância ao.
- () b. pouco menos importante do que o.
- () c. menos importante do que o.
- () d. muito menos importante do que o.
- () e. extremamente menos importante do que o.
- () f. sem importância em relação ao.

Calculou-se a partir dos dados obtidos da pesquisa, os valores médios de importância relativa (S_j) entre critérios (Tabela 17) e entre subcritérios econômicos (Tabela 18), técnicos (Tabela 19), sociais (Tabela 20) e ambientais (Tabela 21).

Tabela 17 - Importância comparativa entre critérios

Importância comparativa				
Tomadores de decisão	C1 Econômico	C2 Técnico	C3 Ambiental	C4 Social
1	0	0	0	20
2	0	20	20	40
3	0	20	20	20
4	0	0	20	20
Ranking	1	2	4	3
Importância comparativa de valores médios S_j	-	0,10	0,15	0,25

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 18 - Importância comparativa entre subcritérios econômicos

Importância comparativa				
Tomadores de decisão	C1-1 Custo do investimento	C1-2 Payback	C1-3 Custo de operação e manutenção	C1-4 Período de construção
1	0	20	40	60
2	0	20	20	20
3	0	0	20	20
4	0	0	60	20
Ranking	1	2	4	3
Importância comparativa de valores médios S_j	-	0,10	0,35	0,30

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 19 - Importância comparativa entre subcritérios técnicos

Importância comparativa			
Tomadores de decisão	C2.1 Potencial de geração de energia	C2.2 Fator de capacidade	C2.3 Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC)
1	0	0	20
2	0	40	40
3	0	0	40
4	0	0	40
Ranking	1	2	3
Importância comparativa de valores médios Sj	-	0,10	0,35

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 20 - Importância comparativa entre subcritérios sociais

Importância comparativa			
Tomadores de decisão	C3.1 Empregos sazonais	C3.2 Empregos permanentes	C3.3 População beneficiada
1	20	0	0
2	20	20	0
3	20	20	0
4	20	20	0
Ranking	3	2	1
Importância comparativa de valores médios Sj	0,20	0,15	-

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 21 - Importância comparativa entre subcritérios ambientais

Importância Comparativa		
Tomadores de decisão	C1 Emissão de CO ² no transporte	C2 Descarte de painéis solares
1	0	0
2	0	0
3	20	0
4	20	0
Ranking	2	1
Importância comparativa de valores médios Sj	0,10	

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Determinada a importância comparativa de valores médios (Sj), passou-se para a etapa de cálculos dos pesos normalizados dos critérios (Tabela 22) e subcritérios econômicos (Tabela 23), técnicos (Tabela 24), sociais (Tabela 25) e ambientais (Tabela 26). No caso dos subcritérios, os pesos normalizados ao final são novamente normalizados em relação ao peso de seu respectivo critério.

Tabela 22 - Cálculo dos pesos normalizados dos critérios

Ranking dos critérios	Importância comparativa de valores médios Sj	Coefficiente Sj + 1	Kj =	Peso recalculado Qj = Qj-1 / Kj	Peso Wj = Qj / ΣQj
C1 Econômico	-	1,00		1,000	0,306
C2 Técnico	0,10	1,10		0,909	0,278
C4 Social	0,25	1,25		0,727	0,222
C3 Ambiental	0,15	1,15		0,632	0,193
				3,269	

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 23 - Cálculo dos pesos normalizados dos subcritérios econômicos

Ranking dos subcritérios econômicos	Importância comparativa de valores médios Sj	Coefficiente $K_j = S_j + 1$	Peso recalculado $Q_j = Q_{j-1} / K_j$	Peso $W_j = Q_j / \sum Q_j$	Peso normalizado por critério
C1-1 - Custo do investimento	-	1,00	1,000	0,320	0,0979
C1-2 - Payback	0,10	1,10	0,909	0,291	0,0890
C1-4 - Período de construção	0,30	1,30	0,699	0,224	0,0684
C1-3 - Custo de operação e manutenção	0,35	1,35	0,518	0,166	0,0507

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 24 - Cálculo dos pesos normalizados dos subcritérios técnicos

Ranking dos subcritérios Técnicos	Importância comparativa de valores médios Sj	Coefficiente $K_j = S_j + 1$	Peso recalculado $Q_j = Q_{j-1} / K_j$	Peso $W_j = Q_j / \sum Q_j$	Peso normalizado por critério
C2-1 - Potencial de geração de energia	-	1,00	1,000	0,387	0,1076
C2-2 - Fator de capacidade	0,10	1,10	0,909	0,352	0,0979
C2-3 - Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC)	0,35	1,35	0,673	0,261	0,0725

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 25 - Cálculos dos pesos normalizados dos subcritérios sociais

Ranking dos subcritérios sociais	Importância comparativa de valores médios Sj	Coefficiente $K_j = S_j + 1$	Peso recalculado $Q_j = Q_{j-1} / K_j$	Peso $W_j = Q_j / \sum Q_j$	Peso normalizado por critério
C3-3 População beneficiada	-	1,00	1,000	0,385	0,0856
C3-2 Empregos permanentes	0,15	1,15	0,870	0,335	0,0744
C3-1 Empregos sazonais	0,20	1,20	0,725	0,279	0,0620

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Tabela 26 - Cálculo dos pesos normalizados dos subcritérios ambientais

Ranking dos subcritérios ambientais	Importância comparativa de valores médios Sj	Coefficiente $K_j = S_j + 1$	Peso recalculado $Q_j = Q_{j-1} / K_j$	Peso $W_j = Q_j / \sum Q_j$	Peso normalizado por critério
C4-2 Descarte de painéis solares	-	1,00	1,000	0,524	0,1011
C4-1 Emissão de CO ₂ no transporte	0,10	1,10	0,909	0,476	0,0919

Fonte: O Autor - Cálculos do SWARA (2019)

Obtido os pesos dos subcritérios empresariais pelo método SWARA, levantou-se dados dos subcritérios empresariais (Tabela 27) de fontes públicas e privadas de livre acesso.

Tabela 27 - Subcritérios empresariais

	Origem dos dados e cálculos
Custo de investimento	Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e Câmara de Comercialização de Energia - CCEE (Leilões)
Payback	Custo de Investimento (R\$) / Geração de Energia (kWh/mês) x Faturamento Líquido (Previsão de R\$ 200,00 por MWh)
Período de construção	Fornecedores nacionais e ANEEL
Custo da equipe de O&M	Empresas de recrutamento e o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae)
Potencial de geração de energia elétrica	Irradiação global horizontal anual (GHI) x Energia gerada por m ² por módulo solar (Canadian Quatech CS6p-260) x Área do site x Eficiência do Site (0,75)
Fator de Capacidade	Potencial anual de geração de energia/ Potencial anual de geração dos módulos solares
Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC)	ANEEL (Site http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/srd/indqual/default.cfm)
Emissão mensal de CO2 no transporte	Pegada ecológica (Site www.pegadaecologica.org.br)
Descarte de módulos solares	Cálculos baseados na geração de energia e energia gerada por módulo solar
Quantidade de empregos sazonais	Fornecedores nacionais
Quantidade de empregos permanentes	Fornecedores nacionais
População a ser beneficiada	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

Fonte: Governamentais e privadas (2019)

De posse dos dados oriundos das fontes públicas e privadas, executou-se quando necessário, os cálculos para definição dos valores dos subcritérios, na sequência se estruturou a matriz de tomada de decisão (Tabela 28) ou consequências, que além dos critérios, pesos e alternativas, apresenta os tipos de medidas e se são critérios de benefícios ou maximização (+), ou de custos ou minimização (-).

Aplicou-se na sequência o método SAW (Apêndice C), obtendo como resultado o ranking dos 10 sites para instalação de usinas fotovoltaicas (Tabela 29) associados as cidades onde se encontram estes sites.

Tabela 28 - Matriz de Tomada de Decisão

Matriz de Tomada de Decisão												
Critério i	Z	Medidas	Pesos	Alternativas j								
				Peabiru	Reserva	Goioxim	Lapa	Terra Rica	Alvorada do Sul	Sertaneja	Terra Roxa	Ivaí
1	-	Milhões R\$	0,098	26,55	15,93	5,31	5,31	15,93	21,24	26,55	5,31	15,93
2	-	Meses	0,089	188	198	197	218	183	183	185	190	202
3	-	Meses	0,068	18	15	12	12	15	18	18	12	15
4	-	R\$	0,051	28180	21948	13504	17990	15300	31164	38955	12642	21948
5	+	GW/hano	0,108	8,47	4,82	1,62	1,46	5,21	6,95	8,61	1,68	4,73
6	+	%	0,098	14,49	13,74	13,86	12,49	14,86	14,86	14,74	14,36	13,49
7	-	Minutos	0,072	23	97	44	44	21	9	10	34	73
8	-	Ton/Mês	0,092	0,19	0,48	1,92	1,28	0,21	1,38	1,55	0,48	1,12
9	-	Número	0,101	25665	15399	5133	5133	15399	20532	25665	5133	15399
10	+	Colaboradores	0,062	14	12	10	10	12	12	14	10	12
11	+	Colaboradores	0,074	5	3	2	2	3	4	5	2	3
12	+	Habitantes	0,086	13000	25000	8000	45000	15000	22000	5000	47000	13000

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 29 - Resultados da Aplicação do Método SAW

Matriz de Tomada de Decisão Normalizada = (Valor do Critério de Benefício / Soma dos Valores dos Critérios Benefícios)												
Critério i	Z	Pesos	Alternativas j									
			Peabiru	Reserva	Goioxim	Lapa	Terra Rica	Alvorada do Sul	Sertaneja	Terra Roxa	Ivaí	Salto do Lontra
1	+	0,098	0,0323	0,0968	0,1613	0,1613	0,0968	0,0645	0,0323	0,1613	0,0968	0,0968
2	+	0,089	0,1026	0,0977	0,0986	0,0882	0,1049	0,1049	0,1042	0,1019	0,0959	0,1011
3	+	0,068	0,0800	0,1000	0,1200	0,1200	0,1000	0,0800	0,0800	0,1200	0,1000	0,1000
4	+	0,051	0,0804	0,1018	0,1308	0,1154	0,1247	0,0702	0,0434	0,1338	0,1018	0,0976
5	+	0,108	0,1744	0,0992	0,0334	0,0301	0,1074	0,1432	0,1774	0,0346	0,0974	0,1029
6	+	0,098	0,1027	0,0973	0,0982	0,0885	0,1053	0,1053	0,1044	0,1018	0,0956	0,1009
7	+	0,072	0,1254	0,0136	0,0937	0,0937	0,1284	0,1465	0,1450	0,1088	0,0498	0,0952
8	+	0,092	0,1596	0,1346	0,0075	0,0640	0,1582	0,0553	0,0401	0,1339	0,0779	0,1688
9	+	0,101	0,0323	0,0968	0,1613	0,1613	0,0968	0,0645	0,0323	0,1613	0,0968	0,0968
10	+	0,062	0,1186	0,1017	0,0847	0,0847	0,1017	0,1017	0,1186	0,0847	0,1017	0,1017
11	+	0,074	0,1563	0,0938	0,0625	0,0625	0,0938	0,1250	0,1563	0,0625	0,0938	0,0938
12	+	0,086	0,0535	0,1029	0,0329	0,1852	0,0617	0,0905	0,0206	0,1934	0,0535	0,2058
SAW - Soma dos Valores de Critérios Versus Pesos dos critérios			0,1013	0,0956	0,0891	0,1043	0,1060	0,0960	0,0876	0,1165	0,0883	0,1143
Ranking SWARA-SAW			5	7	8	4	3	6	10	1	9	2

Fonte: O Autor - Planilhas de cálculos do método SAW (2019)

4.6.2 Complex Proportional Assessment Fuzzy

Aplicou-se junto aos 4 *stakeholders* com perfil de tomadores de decisão e representantes dos investidores, fornecida a matriz de consequência, uma pesquisa de classificações linguísticas (Quadro 2) de critérios e uma pesquisa de classificações linguísticas de alternativas (Quadro 3) para definição dos pesos dos critérios e classificações das alternativas através do método MCDM COPRAS-F, onde as variáveis linguísticas são expressas em números *fuzzy* triangulares.

Quadro 2 - Pesquisa de classificações linguísticas de critérios

UTFPR - PESQUISA DE TOMADA DE DECISÃO PARA INSTALAÇÃO USINAS FOTOVOLTAICAS		
Linguística	SIGLA	Considere-se um investidor em minicentrals fotovoltaicas de 1 MW a 5 MW. Avalie a importância dos critérios e escolha uma classificação linguística através das siglas. Observação: Varios critérios podem ter a mesma importância.
Extremamente Importante	EI	
Altamente Importante	AI	
Muito Importante	MI	
Importante	I	
Pouco importante	PI	
Muito Pouco Importantte	MPI	
Sem Importância	SI	
Critérios		SIGLAS
Custo do Investimento	<input type="text"/>	<input type="text"/>
PayBack	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Período de Construção (Meses)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Custo da Equipe de O&M SEBRAE	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Potencial de Geração de Energia Elétrica	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Fator de Capacidade	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Emissão Mensal de CO2 no Transporte	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Descarte de Placas em 25 anos	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Quantidade de Empregos Sazonais	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Quantidade de Empregos Permanentes	<input type="text"/>	<input type="text"/>
População Beneficiada	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Fonte: O Autor (2019)

Quadro 3 - Pesquisa de classificações linguísticas de alternativas

UTFPR - PESQUISA DE TOMADA DE DECISÃO PARA INSTALAÇÃO USINAS FOTOVOLTAICAS											
Linguística	SIGLAS	Considere-se um investidor com capital próprio e suficiente para investir em minicentrals fotovoltaicas de 1 MW a 5 MW em municípios com consumo garantido de energia. Avalie a qualidade das alternativas de municípios e escolha para cada alternativa a classificação linguística através das siglas.									
Excelente	E	Observações: 1. Varios municípios podem receber a mesma avaliação em um mesmo critério. 2. Em função da quantidade de municípios e critérios, como sugestão avalie os dez municípios, critério a critério, evitando correlacionar os dez municípios com diversos critérios ao mesmo tempo, de forma a não perder o foco e se confundir.									
Muito Boa	MB										
Boa	B										
Regular	R										
Fraca	F										
Muito Fraca	MF										
Pessíma	P										
Critério	Unidade	Peabiru	Reserva	Goioxim	Lapa	Terra Rica	Alvorada do Sul	Sertaneja	Terra Roxa	Ivaí	Salto do Lontra
Custo do Investimento	Milhões R\$	26,55	15,93	5,31	5,31	15,93	21,24	26,55	5,31	15,93	15,93
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
PayBack	Meses	181	190	188	207	175	175	177	182	194	185
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Período de Construção (Meses)	Meses	18	15	12	12	15	18	18	12	15	15
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Custo da Equipe de O&M SEBRAE	R\$	28180,00	21948,00	13504,00	17990,00	15300,00	31164,00	38955,00	12642,00	21948,00	23178,00
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Potencial de Geração de Energia Elétrica	GWh/ano	8,80	5,04	1,69	1,54	5,45	7,28	9,01	1,75	4,92	5,17
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Fator de Capacidade	%	15,05	14,36	14,47	13,14	15,55	15,57	15,42	14,99	14,02	14,73
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora - DEC	Minutos	23,00	97,00	44,00	44,00	21,00	9,00	10,00	34,00	73,00	43,00
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Emissão Mensal de CO2 no Transporte de Funcionários	Ton/Mês	0,19	0,48	1,92	1,28	0,21	1,38	1,55	0,48	1,12	0,09
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Descarte de Placas em 25 anos	Mil	25665	15399	5133	5133	15399	20532	25665	5133	15399	15399
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Quantidade de Empregos Sazonais	Unidade	14	12	10	10	12	12	14	10	12	12
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Quantidade de Empregos Permanentes	Unidade	5	3	2	2	3	4	5	2	3	3
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
População Beneficiada	Mil	13	25	8	45	15	22	5	47	13	50
SIGLAS		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Fonte: O Autor (2019)

A partir dos resultados da pesquisa de classificações linguísticas dos critérios com os tomadores de decisão (D1-D2-D3-D4) aplicando variáveis linguísticas expressas em números *fuzzy* triangulares (Tabela 30), gerou-se uma matriz linguística de critérios (Tabela 31), que foi fuzzificada e defuzzificada (Tabela 32) pelo método do centro da área para se determinar os pesos dos critérios, normalizados ao final.

Tabela 30 - Termos linguísticos para pesquisa de critérios

Termos Linguísticos para Critérios		
Linguística		Número Fuzzy
Extremamente Importante	EI	(0.9, 1.0,1.0)
Altamente Importante	AI	(0.7, 0.9,1.0)
Muito Importante	MI	(0.5, 0.7,0.9)
Importante	I	(0.3, 0.5,0.7)
Pouco importante	PI	(0.1, 0.3,0.5)
Muito Pouco Importante	MPI	(0.0, 0.1,0.3)
Sem Importância	SI	(0.0, 0.0,0.1)

Fonte: Adaptado de Chatterjee e Bose (2012)

Tabela 31 - Matriz linguística de critérios

Criteria	Decision Makers				
	D1	D2	D3	D4	
C1 - Custo de Investimento	-	EI	EI	AI	EI
C2 - PayBack	-	EI	AI	AI	MI
C3 - Período de Construção	-	AI	MI	I	AI
C4 - Custo da Equipe de O&M	-	AI	MI	PI	MI
C5 - Potencial de Geração de Energia Elétrica	+	EI	EI	MI	EI
C6- Fator de Capacidade	+	EI	I	MI	AI
C7 - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora	-	SI	MPI	AI	I
C8 - Emissão Mensal de CO2 no Transporte	-	MPI	MPI	EI	I
C9 - Descarte de Placas	-	MI	MI	EI	MI
C10 - Quantidade de Empregos Sazonais	+	I	MPI	MI	I
C11 - Quantidade de Empregos Permanentes	+	I	MPI	MI	MI
C12 - População Beneficiada	+	I	AI	AI	I

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 32 - Pesos dos critérios: fuzzificação defuzzificação e normalização

Critérios		Tomadores de Decisão												Média	Método do Centro da Área (COA)	qj		
		D1			D2			D3			D4							
C1 - Custo de Investimento	-	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,850	0,975	1,000	0,942	0,117
C2 - PayBack	-	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,700	0,875	0,975	0,850	0,105
C3 - Período de Construção	-	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0	0,550	0,750	0,900	0,733	0,091
C4 - Custo da Equipe de O&M	-	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,450	0,650	0,825	0,642	0,080
C5 - Potencial de Geração de Energia Elétrica	+	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,800	0,925	0,975	0,900	0,112
C6- Fator de Capacidade	+	0,9	1,0	1,0	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,7	0,9	1,0	0,600	0,775	0,900	0,758	0,094
C7 - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora	-	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,7	0,9	1,0	0,3	0,5	0,7	0,250	0,375	0,525	0,383	0,048
C8 - Emissão Mensal de CO2 no Transporte	-	0,0	0,1	0,3	0,0	0,1	0,3	0,9	1,0	1,0	0,3	0,5	0,7	0,300	0,425	0,575	0,433	0,054
C9 - Descarte de Placas	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,5	0,7	0,9	0,600	0,775	0,925	0,767	0,095
C10 - Quantidade de Empregos Sazonais	+	0,3	0,5	0,7	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,275	0,450	0,650	0,458	0,057
C11 - Quantidade de Empregos Permanentes	+	0,3	0,5	0,7	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,325	0,500	0,700	0,508	0,063
C12 - População Beneficiada	+	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,3	0,5	0,7	0,500	0,700	0,850	0,683	0,085
8,058																		

Fonte: O Autor (2019)

A partir dos resultados da pesquisa de classificações linguísticas das alternativas com os tomadores de decisão (D1, D2, D3 e D4) aplicando variáveis linguísticas expressas em números *fuzzy* triangulares (Tabela 33), gerou-se uma matriz linguística para as alternativas (Tabelas 34, 35, 36) dos locais: Peabiru (A1), Reserva (A2), Goioxim (A3), Lapa (A4), Terra Rica (A5), Alvorada do Sul (A6), Sertaneja (A7), Terra Roxa (A8), Ivaí (A9) e Salto do Lontra (A10).

Matriz linguística, que foi fuzzificada, defuzzificada, normalizada e ponderada, conforme detalhado no Apêndice B, para ao final executar os cálculos e determinar o ranking das alternativas de locais para instalação de usinas fotovoltaicas (Tabela 37).

Tabela 33 - Termos linguísticos para pesquisa de alternativas

Termos Linguísticos para Alternativas		
Linguística		Número Fuzzy
Excelente	E	(0.9, 1.0,1.0)
Muito Boa	MB	(0.7, 0.9,1.0)
Boa	B	(0.5, 0.7,0.9)
Regular	R	(0.3, 0.5,0.7)
Fraca	F	(0.1, 0.3,0.5)
Muito Fraca	MF	(0.0, 0.1,0.3)
Pessíma	P	(0.0, 0.0,0.1)

Fonte: Adaptado de Chatterjee e Bose (2012)

Tabela 34 - Matriz linguística de alternativas A1 - A2 - A3 - A4

Critérios		Tomadores de Decisão															
		D1				D2				D3				D4			
		A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
C1	-	P	R	E	E	F	B	E	E	F	R	MB	MB	P	F	E	E
C2	-	MB	B	B	R	B	B	B	F	R	F	R	F	B	B	B	R
C3	-	R	B	E	E	R	B	MB	MB	F	F	F	F	B	MB	E	E
C4	-	F	F	MB	R	R	B	MB	B	P	P	MF	MF	MF	F	E	B
C5	+	MB	B	F	F	E	B	F	F	B	R	F	F	E	MB	R	R
C6	+	B	B	B	R	MB	B	B	R	B	B	B	B	B	B	B	B
C7	-	R	P	MF	MF	MB	P	R	R	F	P	F	F	B	F	R	R
C8	-	MB	B	F	R	E	B	P	P	R	R	P	P	E	E	MB	MB
C9	-	P	F	MB	MB	F	B	E	E	F	F	R	R	R	B	E	E
C10	+	E	MB	B	B	MB	B	B	B	R	R	R	R	R	R	R	R
C11	+	E	B	B	B	MB	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
C12	+	B	MB	B	E	R	B	F	MB	R	R	R	B	MB	MB	B	E

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 35 - Matriz linguística de alternativas A5 - A6 - A7 - A8

Critérios	Tomadores de Decisão																
	D1				D2				D3				D4				
	A5	A6	A7	A8	A5	A6	A7	A8	A5	A6	A7	A8	A5	A6	A7	A8	
C1	-	R	F	P	E	B	R	F	E	R	F	F	MB	F	MF	P	E
C2	-	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	B	R	R	R	R	B	B	B	B
C3	-	B	R	R	E	B	R	R	MB	F	F	F	F	MB	B	B	E
C4	-	B	MF	P	MB	MB	R	F	E	MF	P	P	MF	MB	P	MF	E
C5	+	B	MB	MB	F	B	MB	E	F	R	B	B	F	MB	MB	E	R
C6	+	B	B	B	B	E	E	E	B	B	B	B	B	B	B	B	B
C7	-	R	B	B	F	MB	E	E	B	F	R	R	F	B	E	E	R
C8	-	MB	F	F	B	MB	P	P	B	R	P	P	R	E	MB	MB	E
C9	-	F	MF	P	MB	B	R	F	E	F	F	F	R	B	B	B	E
C10	+	MB	MB	E	B	B	B	MB	B	R	R	R	R	R	R	R	R
C11	+	B	MB	E	B	B	MB	MB	B	B	B	B	B	B	B	B	B
C12	+	R	MB	B	E	R	B	F	MB	R	R	R	B	MB	MB	B	E

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 36 - Matriz linguística de alternativas A9 - A10

Critérios	Tomadores de Decisão								
	D1		D2		D3		D4		
	A9	A10	A9	A10	A9	A10	A9	A10	
C1	-	R	R	B	B	R	R	F	F
C2	-	R	B	R	B	F	R	B	B
C3	-	B	B	B	B	F	F	MB	MB
C4	-	F	F	B	B	P	P	F	F
C5	+	B	B	B	B	R	R	MB	MB
C6	+	B	B	B	B	B	B	B	B
C7	-	P	MF	MF	R	P	F	F	R
C8	-	R	E	MF	E	P	R	E	E
C9	-	F	F	B	B	F	F	B	B
C10	+	MB	MB	B	B	R	R	R	R
C11	+	B	B	B	B	B	B	B	B
C12	+	B	E	R	E	R	B	MB	E

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 37 - Ranking COPRAS-F das alternativas

Cálculos e Ranking						
Alternativas	Pi Soma dos Critérios de Benefício (Maximização)	Ri- Soma dos Critérios de Custo (Minimização)	1/Ri	Qi Pesos Relativos das Alternativas	Ui Prioridades das Alternativas	Ranking
A1	0,046	0,046	21,81	0,118	0,956	2
A2	0,042	0,053	18,96	0,105	0,846	5
A3	0,033	0,077	13,06	0,076	0,619	10
A4	0,036	0,069	14,48	0,084	0,678	8
A5	0,041	0,067	14,95	0,090	0,732	7
A6	0,046	0,048	21,05	0,115	0,934	3
A7	0,045	0,042	23,69	0,124	1,000	1
A8	0,037	0,083	12,10	0,077	0,625	9
A9	0,041	0,048	20,66	0,109	0,882	4
A10	0,044	0,058	17,37	0,101	0,819	6
		0,589	178,13			

Fonte: O Autor (2019)

4.6.3 Análise dos Resultados

A Tabela 38 apresenta os resultados da seleção no SIG e da ordenação pelos métodos multicritérios SWARA-SAW e COPRAS-F dos sites para instalação de usinas solares fotovoltaicas.

Tabela 38 - Ranking SIG-MCDM

Método	RANKING SIG-MCDM									
	Alternativas									
	Peabiru	Reserva	Goioxim	Lapa	Terra Rica	Alvorada do Sul	Sertaneja	Terra Roxa	Ivaí	Salto do Lontra
RANKING SIG-MCDM	4	8	7	10	1	2	3	5	9	6
Ranking SWARA-SAW	5	7	8	4	3	6	10	1	9	2
Ranking COPRAS-F	2	5	10	8	7	3	1	9	4	6

Fonte: O Autor (2019)

Observam-se discrepâncias com relação aos rankings (Tabela 38), as quais são avaliadas detalhadamente na sequência, inclusive levando em conta os dados da matriz de decisão (Tabela 28):

- As diferenças dos rankings, confirmam que os índices de adequação geográfico não são um fator determinístico nos rankings do SWARA-SAW e do COPRAS-F, deixando evidente a necessidade da aplicação de métodos MCDM com critérios empresariais na ordenação de sites selecionados pelo SIG para instalação de minicentrals fotovoltaicas;
- Os melhores e os piores resultados do ranking do SWARA-SAW em uma tomada de decisão mais coletiva foram ligeiramente influenciados por critério social. Uma maior população a ser beneficiada, melhorou a classificação, uma menor população a ser beneficiada piorou a classificação;
- Os resultados do SWARA-SAW indicam que neste caso prevaleceu no comportamento em grupo uma preocupação com uma compensação técnico social ao optar por uma menor geração, porém privilegiando uma maior população;
- Os melhores e os piores resultados do ranking do COPRAS-F em uma tomada de decisão mais individual foram ligeiramente mais influenciados por critério técnico. Um maior potencial de geração melhorou a classificação, um menor potencial de geração piorou a classificação;

- Os resultados do COPRAS-F indicam que neste caso prevaleceu no comportamento individual uma preocupação com uma compensação técnico econômica ao optar por uma maior geração compensando os altos custos de investimento;
- Com relação a localização dos três melhores sites, no caso do SWARA-SAW encontram-se no sudoeste e noroeste do estado do Paraná e no caso do COPRAS-F encontram-se no noroeste e norte do estado do Paraná.

Avaliando os resultados devido a participação do mesmo grupo de *stakeholders* nas pesquisas que determinaram os rankings dos métodos SWARA-SAW e COPRAS-F, considera-se que não ocorreram influências mútuas entre os resultados de ambos os métodos, pois além das pesquisas terem ocorrido com defasagem de um ano, os métodos aplicam filosofias completamente diferentes, conforme mostrado a seguir:

- As pesquisas do SWARA-SAW abordam comparações de importância intercritérios e as pesquisas do COPRAS-F abordam comparações de importância intercritérios e comparações de performance intracritérios;
- As pesquisas do SWARA-SAW utilizam escalas verbais de score e de percentual nas comparações de importância intercritérios e as pesquisas do COPRAS-F utilizam escalas linguísticas associadas a números *fuzzy* nas comparações de importância intercritérios e nas comparações de performance intracritérios.

Ao comparar os resultados do SIG desta pesquisa com estudos também realizados no sul do Brasil, observa-se que o estado do Rio Grande do Sul com 281.748 km² apresenta 67,23% de terras inadequadas para instalações fotovoltaicas, principalmente devido ao alto declive (REDISKE *et al.*, 2020), verifica-se que contrariamente, o estado Paraná apresenta 25,1% das terras com condições adequadas mínimas, 36,4% adequadas e 12,6% altamente adequadas para instalação de usinas solares fotovoltaicas.

Com relação a análise de sensibilidade, no SWARA-SAW foi aplicado uma variação de 20% nos pesos dos critérios, com mudanças de ordenação somente da quinta a décima alternativa, no caso do COPRAS-F, o grau de utilidade das

alternativas não deixou dúvida percentual quanto as primeiras classificações do ranking, assim não foi realizado nenhum teste de sensibilidade aplicando alternadamente um critério com pesos linguísticos extremamente importante e os demais com pesos linguísticos sem importância.

Com relação as diferenças discrepantes dos rankings SWARA-SAW e COPRAS-F, uma das hipóteses seria a pouca disponibilidade de tempo dos decisores nas avaliações durante as pesquisas das influências dos perfis das funções valores intracritérios e das compensações intercritérios da matriz de decisão, refletindo nos julgamentos de importância dos critérios e das alternativas.

Com intuito de balancear um pouco estes rankings, aplicou-se o método da Borda (Tabela 39) considerando ordenação ascendente e com desempate pelo ranking do SIG, equilibrando os critérios geográficos, técnico-econômicos e socioambientais, o que pode ser constatado comparando o ranking do método da Borda com os dados da matriz de decisão (Tabela 28).

Tabela 39 - Método da Borda

Método	Método da Borda									
	Alternativas									
	Peabiru	Reserva	Goioxim	Lapa	Terra Rica	Alvorada do Sul	Sertaneja	Terra Roxa	Ivaí	Salto do Lontra
Ranking SIG	4	8	7	10	1	2	3	5	9	6
Ranking SWARA-SAW	5	7	8	4	3	6	10	1	9	2
Ranking COPRAS-F	2	5	10	8	7	3	1	9	4	6
Soma	11	20	25	22	11	11	14	15	22	14
Ordenação Ascendente	1	7	10	9	2	3	5	6	8	4

Fonte: O Autor (2019)

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS MODELOS

Segue uma breve discussão de diferenças essenciais entre os modelos e uma análise e discussão do modelo SIG-MCDM proposto.

5.1 BREVE DISCUSSÃO DAS DIFERENÇAS DE MODELOS

Os atuais modelos de localização de sites para instalação de plantas fotovoltaicas usando métodos multicritérios espaciais apresentados pela literatura adotaram duas abordagens.

Na primeira abordagem, os autores empregam critérios geográficos ao ordenarem alternativas de sites através do SIG, aplicando um método multicritério compensatório na atribuição de pesos aos critérios geográficos com base na opinião de especialistas. Apesar da utilização de um método multicritério confiável, a questão fundamental que se coloca é sobre a existência de opiniões divergentes de diferentes especialistas em um mesmo ambiente de estudo.

Na segunda abordagem, alguns autores empregam critérios geográficos ao ordenarem alternativas de sites através de métodos multicritério, como é o caso de Lozano *et al.* (2013) e Rediske *et al.* (2020), que aplicaram o método compensatório TOPSIS. Vafaeipour *et al.* (2014), aplicaram critérios econômicos, ambientais, sociais e de risco ao ordenarem as melhores alternativas de sites para instalação de plantas fotovoltaicas empregando o método compensatório WASPAS.

Diferentemente das abordagens dos atuais modelos, nesta pesquisa procurou-se aperfeiçoar ao:

- Atribuir pesos aos critérios geográficos no SIG aplicando a técnica WMPDP, que espelha o comportamento das grandezas físicas geográficas da região pesquisada, tornando os pesos dos critérios mais realistas e consistentes com o ambiente geográfico avaliado;
- Tomar cuidado com a natureza dos critérios escolhidos pelos *stakeholders*, aplicando-se métodos compensatórios ao ordenar as melhores alternativas de sites selecionadas no SIG para instalação de plantas fotovoltaicas.

5.2 ANÁLISE E DISCUSSÃO DO MODELO SIG-MCDM PROPOSTO

Com relação a aplicação do modelo proposto em termos de estrutura e filosofia, tem-se:

- A seleção das alternativas de sites para instalação de plantas fotovoltaicas através do índice de adequação geográfico máximo das áreas, obtido por meio da álgebra de mapas de subcritérios geográficos no ambiente do SIG, com o uso da técnica WMPDP aplicada no cálculo dos pesos dos mapas de subcritérios geográficos;
- Aplicação de métodos multicritério com critérios empresariais ao ordenar as alternativas selecionadas no ambiente SIG.

Aplicou-se o método SWARA-SAW com o objetivo de avaliar os processos decisórios descentralizados envolvendo decisões em grupo e o método COPRAS-F com o objetivo de avaliar os processos decisórios centralizados envolvendo decisões individuais.

O método multicritério SWARA-SAW apresentou em sua aplicação, vantagens e limitações, principalmente:

- Facilidade na coleta de dados através de pesquisas, solução de conflitos entre decisores com reuniões de consenso, refletindo o comportamento coletivo dos decisores quando submetidos a negociações, associado a simplicidade de entendimento e a facilidade dos cálculos do SAW;
- Possibilidades de distorções no ranking devido à ausência de escalas de referência na literatura, baixa interação com os decisores em função da indisponibilidade de tempo, lideranças influentes distorcendo opiniões durante as pesquisas e dificuldades comentadas pelos decisores relativas as comparações relativas de importância devido a discordância de classificações de importância de critérios.

O método multicritério COPRAS-F apresentou em sua aplicação vantagens e limitações, principalmente:

- Facilidade na coleta de informações nas pesquisas linguísticas, modelagem das imprecisões dos dados reais, atenuando em sua filosofia difusa os conflitos ao agregar decisões individuais através da média *fuzzy* com posterior defuzzificação, eliminando a necessidade de reuniões de consenso e refletindo o comportamento individual dos decisores;
- Aplicação direta de subcritérios de benefício e custo, além do cálculo do grau de utilidade (significância) das alternativas, mostrando percentualmente até que ponto uma alternativa é melhor ou pior que outras alternativas, o que auxilia visualmente na tomada de decisão;
- Possibilidades de distorções de ranking em função da complexidade matemática do *fuzzy*, com julgamentos linguísticos equivocados por parte dos decisores durante as pesquisas ao não associarem racionalmente os perfis intercritério e os ranges intracritérios das funções valores com escolhas racionais dos números *fuzzy* para importância de critérios e performance de alternativas.

Ambos os métodos, devido as características citadas acima, demonstram serem interessantes para empresas investidoras em projetos de infraestrutura, quando tomados os devidos cuidados com as limitações, sendo que, o SWARA-SAW apresenta-se como uma excelente solução no caso de empresas cujos investidores têm o hábito de tomadas de decisão de forma mais coletiva e o COPRAS-F apresenta-se como uma excelente solução no caso de empresas cujos investidores têm o hábito de tomadas de decisão de forma mais individual.

6 CONCLUSÕES

O modelo proposto neste estudo primeiro seleciona os locais no SIG através do índice de adequação geográfico máximo do solo, em seguida, o modelo ordena as alternativas de locais selecionados através da aplicação conveniente de métodos MCDM, considerando todas as partes interessadas, mas do ponto de vista dos investidores. A região escolhida para aplicação do modelo foi o estado do Paraná no sul do Brasil, que apresenta heterogeneidades geográficas, econômicas e socioambientais.

Os resultados do SIG mostraram que, do ponto de vista geográfico, a região avaliada é adequada para instalação de usinas solares fotovoltaicas em grande parte de seu território. A ordenação de sites usando critérios empresariais na segunda parte indicou os melhores locais para investimentos em diferentes regiões do estado, a depender do método multicritério, no sudoeste, noroeste e norte do estado do Paraná.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DO MODELO SIG-MCDM PROPOSTO

Seguem as principais contribuições do modelo SIG-MCDM proposto:

- Apresenta na Figura 6 uma análise intercritério e intracritérios visando a escolha de um método multicritério adequado, considerando o perfil das empresas e o perfil e o tipo de racionalidade dos decisores de forma a evitar distorções no modelo de decisão;
- Apresenta um processo de tomada de decisão de empreendimentos de centrais fotovoltaicas envolvendo *stakeholders* com diferentes níveis de expectativa e cenários de interesses, o que do ponto de vista do investidor, certamente aumenta as chances de realização dos investimentos públicos ou privados, que são essenciais para alavancar a geração de energia renovável;
- Considera todas as partes interessadas no processo de tomada de decisão, mas com foco nos investidores como tomadores de decisão

- Apresenta na área operacional uma contribuição para analistas em multicritério e/ou especialistas em SIG com um procedimento de atribuição de pesos através da técnica WMPDP;
- Adaptabilidade do modelo de decisão para aplicação em outras regiões;
- Serve de subsídio para estudos em outras partes do mundo com as mesmas características, auxiliando como ferramenta técnica o desenvolvimento de políticas que visem fomentar investimentos fotovoltaicos, levando em consideração principalmente a eficiência energética dos projetos;
- Permite aos *stakeholders* selecionarem as melhores áreas geográficas, eliminando questões ambientais e ordenarem as melhores áreas em termos empresariais garantindo a sustentabilidade dos empreendimentos de geração distribuída.

6.2 SUGESTÕES DE APERFEIÇOAMENTOS DO MODELO SIG-MCDM

Seguem algumas sugestões como próximos passos no aperfeiçoamento do modelo SIG-MCDM:

- Desenvolver pesquisas envolvendo estruturação de critérios para aplicações de localização de sites para energias renováveis distribuídas, prioritariamente energia eólica, híbrida eólica-fotovoltaica e hidráulica voltada para pequenas centrais hidrelétricas;
- Aplicar outros métodos MCDM e MCDM-*FUZZY* integrados ao SIG;
- Aplicar SIG com outros critérios e subcritérios geográficos, inclusive avaliando diferentes funções *fuzzy*;
- Aplicar, quando pertinente, os seguintes critérios para projetos internacionais: instabilidade política e econômica, mudanças na política energética, política de financiamentos, liberações ambientais, disponibilidade tecnológica, diversificação de mercado, concorrência e possibilidades de futuros projetos;
- Estender a um terceiro conjunto de critérios, referentes a conexão, proteção e estabilidade na rede elétrica.

REFERÊNCIAS

- ALBANSKI, E. S. Análise de áreas potenciais para instalação de usinas solares no estado do Paraná. **Universidade Federal do Paraná**, 2018.
- ALMEIDA, A. T., ALMEIDA, J. A., COSTA, A. P. C. S., ALMEIDA-FILHO, A. T. A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff. **European Journal of Operational Research**, Vol. 250, n. 1, p. 179-191, 2016.
- ALMEIDA, A. T.; ALMEIDA, J. A.; COSTA, A. P. C. S.; ALMEIDA-FILHO, A. T. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. **IMA Journal Management Mathematics**, n. 28, p. 153-84, 2017.
- ALMEIDA, L. F. P.; SOLA, A. V. H.; BEHAINNE, J. J. R. Sugarcane bagasse pellets: characterization and comparative analysis. **Acta Sci.**, v. 39, n. 4, p. 461-68, 2017.
- ALY SP, AHZI S, BARTH N. Effect of physical and environmental factors on the performance of a photovoltaic panel. **Sol Energy Mater Sol Cells**, n. 200, p. 109948, 2019.
- AL GARNI, H. Z.; AWASTHI, A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. **Applied Energy**, n. 206, p. 1225-1240, 2017.
- ANGELOPOULOS, D.; DOUKAS, H.; PSARRAS, J.; STAMTSIS, G. Risk-based analysis and policy implications for renewable energy investments in Greece. **Energy Policy**, v. 105, p. 512-23, 2017.
- ANWARZAI, M. A.; NAGASAKA, K. Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 71, p. 150-60, 2017.
- AYDIN, N. Y.; KENTEL, E.; DUZGUN, H. S. GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey. **Energy Conversion and Management**, n. 70, p. 90-106, 2013.
- AZIZKHANI M, VAKILI A, NOOROLLAHI Y, NASERI F. Potential survey of photovoltaic power plants using Analytical Hierarchy Process (AHP) method in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 75, p. 1198-1206, 2017.
- BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C. MACBETH - An interactive path towards the construction of cardinal value functions. **International Transactions in Operational Research**, v. 1, n. 4, p. 489-500, 1994.

BELTRÁN, P. A.; GONZÁLEZ, F. C.; PASCUAL, J.; FERRANDO, P.; RUBIO, A. P. An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-based multi-criteria decision approach for the selection of solar-thermal power plant investment projects. **Energy**, n. 66, p. 222-238, 2014.

BHATTACHARYYA, S. C.; PALIT, D.; SARANGI, G.; SRIVASTAVA, V.; SHARMA, P. Solar PV minigrids versus large-scale embedded PV generation: a case study of Uttar Pradesh (India). **Energy Policy**, n. 128, p. 36-44, 2019.

BOUYSSOU D. Some remarks on the notion of compensation in MCDM. **Eur J Oper Res.**, n. 26, p. 150-60, 1986.

BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. Promethee methods. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. Boston: Springer Science and Business Mediam, 2005. p. 163-196.

BREWER, J.; AMES, D. P.; SOLAN, D.; LEE, R.; CARLISLE J. Using GIS analytics and social preference data to evaluate utility-scale solar power site suitability **Renewable Energy**, n. 81, p. 825-836, 2015.

CARSTENS, D. D. S.; CUNHA, S. K. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, n. 125: 396-404, 2019.

CASTILLO, C. P.; SILVA, F. B.; LAVALLE, C. An assessment of the regional potential for solar power generation in EU-28. **Energy Policy**, n. 88, p. 86-99, 2016.

CHARABI, Y.; GASTLI A. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. **Renewable Energy**, n. 36, p. 2554-2561, 2011.

CHATTERJEE, N. C.; BOSE G. K. A COPRAS-F base multi-criteria group decision making approach for site selection of wind farm. **Decision Science Letters**, n. 2, p. 1-10, 2012.

EDWARDS, W. How to use multiattribute utility measurement for social decision making. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. SMC-7, n. 5, p. 326-340, 1977.

EDWARDS, W.; BARRON, F. H. SMARTS and SMARTER: improved simple methods for multiattribute utility measurement. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 60, p. 306-325, 1994

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Brazilian Energy Balance 2019 Year 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

ERVURAL BC, ZAIM S, DEMIREL OF, AYDIN Z, DELEN D. An ANP and fuzzy TOPSIS based SWOT analysis for Turkey's energy planning. **Renew Sustain Energy Rev.**, n. 82, p. 1538-50, 2018.

GLOBAL Solar Atlas. **Photovoltaic power potential by country**. Washington DC, USA: The World Bank, 2019. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download>. Acesso em: 23 jun. 2020.

GORSEVSKI PV, DONEVSKA KR, MITROVSKI CD, FRIZADO JP. Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information systems for landfill site selection: A case study using ordered weighted average. **Waste Management**, n.32: p. 287-96, 2012.

GROSSMANN WD, GROSSMANN I, STEININGER KW. Solar electricity generation across large geographic areas, Part II: A Pan-American energy system based on solar **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 32, p. 983-93, 2014.

GUAITA-PRADAS I, BLASCO-RUIZ A. Analyzing profitability and discount rates for solar PV plants: a Spanish case. **Sustainable Energy**, n. 12, p. 3157, 2020.

GUNDERSON I, GOYETTE S, SILVA AG, QUIQUEREZ L, LEHMANN A. Climate and land-use change impacts on potential solar photovoltaic power generation in the Black Sea region **Environmental Science & Policy**, n. 46, p. 70-81, 2015.

HADDAD B, LIAZID A, FERREIRA P. A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system. **Renewable Energy**, n. 107, p. 462-472, 2017.

HWANG C-L, YOON K. **Multiple attribute decision making: methods and applications**. Springer-Verlag, New York, 1981.

IEA (International Energy Agency). **World energy outlook 2004**. Paris: IEA Publications, 2004.

IEA (International Energy Agency). **Renewables information: overview**. Publications, 2018.

IEA (International Energy Agency). **Renewable Energy Market Update**. Paris: IEA Publications, 2020

IPARDES (Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social). Disponível em: www.ipardes.gov.br. Acesso em: 23 jun. 2018.

IRENA (International Renewable Energy Agency). **Renewable Power Generation Costs in 2018**. Abu Dhabi: IRENA, 2019.

JACQUET-LAGRÈZE, E.; SISKOS, J. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making the UTA method. **European Journal of Operational Research**, n. 10, p. 151-164, 1982.

JANKE, J. R. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. **Renewable Energy**, n. 35, p. 2228-2234, 2010.

JUODAGALVIENĖ B, TURSKIS Z, ŠAPARAUSKAS J, ENDRIUKAITYTĖ A. Integrated Multi-Criteria Evaluation House's Plan Shape based on the EDAS and SWARA Methods, **Engineering Structures and Technologies**, v. 9, n. 3, p. 117-125, 2017.

KARASAN, A.; BOLTURK, E.; KAHRAMAN, C. A novel neutrosophic CODAS method: Selection among wind energy plant locations. **J. Intell. Fuzzy Syst.**, n. 36, p. 1491-1504, 2019.

KABIR E.; KUMAR P.; KUMAR S.; ADELODUN, A.A.; KIM, K-H. Solar energy: potential and future prospects, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 82, p. 894-900, 2018.

KEENEY RL, RAIFFA H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs**. New York: John Wiley, 1976.

KLEIN S.J.W, WHALLEY S. Comparing the sustainability of U.S. electricity options through multi-criteria decision analysis. **Energy Policy**, n. 79, p. 127-149, 2015.

LAI, C.S.; JIA, Y.; LAI, L.L.; XU, Z.; MCCULLOCH, M. D.; WONG, K. P. A comprehensive review on large-scale photovoltaic system with applications of electrical energy storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 78, p. 439-451, 2017.

LA ROVERE EL, SOARES JB, OLIVEIRA LB, LAURIA T. Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to support decision making **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 14, p. 422-29, 2014.

LEE, H. C.; CHANG, C. T. Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 92, p. 883-896, 2018.

LOZANO, J. M.S.; SOLANO, J. T.; ELVIRA, P. L. S.; CASCALES, M. S. G. Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 24, p. 544-56, 2013.

MACEDO, P. P.; MOTA, C. M. M.; SOLA, A. V. H. Meeting the Brazilian energy efficiency law: a flexible and interactive multicriteria proposal to replace non-efficient motors. **Sustain Cities Soc.**, 41: 822-32, 2018.

MCKENNEY, D. W.; PELLAND, S.; POISSANT, Y.; MORRIS, R.; HUTCHINSON, M.; PAPADOPOULOS, P.; LAWRENCE, K.; CAMPBELL, K. Spatial insolation models for photovoltaic energy in Canada. **Solar Energy**, n. 82, p. 1049-1061, 2008.

MALCZEWSKI J. On the use of weighted linear combination method in GIS: common and best practice approaches. **Trans GIS**, v. 4, n. 1, p. 5-22, 2000.

MALEKI, A.; POURFAYAZ, F.; HAFEZNIYA, H.; ROSEN, M. A. A novel framework for optimal photovoltaic size and location in remote areas using a hybrid method: a case study of eastern Iran. **Energy, Conversion and Management**, n. 153, p. 129-143, 2017.

MARDANI, NILASHI, M.; ZAKUAN, N.; LOGANATHAN, N.; SOHEILIRAD, SAMAN, M. Z. M.; IBRAHIM, O. A systematic review and meta-Analysis of SWARA and WASPAS methods: Theory and applications with recent fuzzy developments. **Applied Soft Computing**, n. 57, p. 265-292, 2017.

MAXIM A. Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis **Energy Policy**, n. 65, p. 284-297, 2014.

MELIA, Y. Multi attribute decision making using simple additive weighting and weighted product in investment. **Intern Acad J Bus Manag.**, v. 3, n. 2, p. 58-72, 2016.

MERROUNI, A. A.; ELALAOU, F. E.; MEZRHAB, A.; MEZRHAB, A.; GHENNIQUI, A. Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process: case study: Eastern Morocco. **Renewable Energy**, n. 119, p. 863-873, 2018.

MOURMOURIS, J. C.; POTOLIAS, C. A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: a case study Thassos, Greece. **Energy Policy**, n. 52, p. 522-530, 2013.

MUSSARD M. Solar energy under cold climatic conditions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 74, p. 733-745, 2017.

NEZHAD, M. R. G.; ZOLFANI, S. H.; MOZTARZADEH, F.; ZAVADSKAS, E. K.; BAHRAMI, M. Planning the priority of high tech industries based on SWARA-WASPAS methodology. The case of the nanotechnology industry in Iran. **Economic Research**, v. 28, n. 1, p. 1111-1137, 2015.

ONAT N, BAYAR H. The sustainability indicators of power production systems **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 14, p. 3108-15, 2010.

OPRICOVIC S, TZENG G-H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. **Eur J Oper Res.**, v. 178, n. 2, p. 514-29, 2007.

PANAHI S, KHAKZAD A, AFZAL P. Application of stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) for copper prospectively mapping in the Anarak region, central Iran, Arabian. **Journal of Geosciences**, n. 10, p. 484, 2017.

PODVEZKO, V. The comparative analysis of MCDA methods SAW and COPRAS. **Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics**, n. 22(2), p. 134-146, 2011.

POTIĆ, I.; GOLIĆ, R.; JOKSIMOVIĆ T. Analysis of insolation potential of Knjaževac Municipality (Serbia) using multi-criteria approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 56, p. 235-45, 2016.

REDISKE G, SILUK JCM, MICHELS L, RIGO PD, ROSA CB, CUGLER G. Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil. **Energy**, n. 197, p. 117-167, 2020.

ROJAS-ZERPA JC, YUSTA JM. (2015). Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas. **Renew Sustain Energy Rev.**, n. 52, p. 557-71, 2015.

ROY B. **Multicriteria methodology for decision analysis**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

ROY B, BOUYSSOU D. Comparison of two decision-aid models applied to a nuclear power plant siting example. **European Journal of Operational Research**, n. 25, p. 200-215, 1986.

SAATY T. **The Analytical Hierarchy Process**. New York: Wiley, 1994.

SABO, M.L.; MARIUN, N.; HIZAM, H.; RADZI, M.; ZAKARIA A. Spatial energy predictions from large-scale photovoltaic power plants located in optimal sites and connected to a smart grid in Peninsular Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 66, p. 79-94, 2016.

SAHU, B.K. A study on global solar PV energy developments and policies with special focus on the top ten solar PV power-producing countries, **Renew Sustain Energy Rev.**, v. 43, p. 621-634, 2015.

SAMANLIOGLU, F.; AYAG, Z. A fuzzy AHP-PROMETHEE II approach for evaluation of solar power plant location alternatives in Turkey. **J. Intell. Fuzzy Syst.**, n. 33, p. 859-871, 2017.

SCHMELA M, BEAUVAIS A, CHEVILLARD N, PAREDES MG, HEISZ M, ROSSI R *et al.* Global market outlook for solar power - 2018-2022.

SOLA AVH, MOTA CMM, KOVALESKI JL. A model for improving energy efficiency in industrial motor system using multicriteria analysis. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 645-54, 2011.

SOLA AVH, MOTA CMM. A multi-attribute decision model for portfolio selection aiming to replace technologies in industrial motor systems. **Energy Convers Manag.**, n. 57, p. 97-106, 2012.

STANUJKIC, D.; KARABASEVIC, D; ZAVADSKAS, E. K. A Framework for the Selection of a Packaging Design Based on the SWARA Method. **Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics**, v. 26, n. 2, p. 181-187, 2015.

STEIN, E. W. A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 22, p. 640-54, 2013.

SUURONEN, A.; LENSU, A.; KUITUNEN, M.; ALVEAR, A. R.; CELIS, N. G.; MIRANDA, M.; PEREZ, M.; KUKKONEN, J. V. K. Optimization of photovoltaic solar power plant locations in northern Chile. **Environmental Earth Sciences**, n. 76, p. 824, 2017.

TAHRI, M.; HAKDAOUI, M.; MAANAN M. 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**, n. 51, p. 1354-62, 2015.

TOMOSK, S.; HAYSOM, J. E.; HINZER, K.; SCHRIEMER, H.; WRIG, D. Mapping the geographic distribution of the economic viability of photovoltaic load displacement projects in SW USA. **Renewable Energy**, n. 107, p. 101-112, 2017.

TSOUTSOS, T.; DRANDAKI, M.; FRANTZESKAKI, N.; IOSIFIDIS, E.; KIOSSES, I. Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. **Energy Policy**, n. 37, p. 1587-1600, 2009.

UYAN, M. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 28, p. 11-17, 2013.

VAFAEIPOUR, M.; ZOLFANI, S. H.; VARZANDEH, M. H. M.; DERAKHTI, A.; ESHKALAG, M. K. 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**, n. 86, p. 653-663, 2014.

WANDERER, T.; HERLE S. Creating a spatial multi-criteria decision support system for energy related integrated environmental impact assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, n. 52, p. 2-8, 2015.

WANG, J. J.; JING, Y. Y.; ZHANG, C. F.; ZHAO, J. H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 13, p. 2263-78, 2009.

WANG, S.; ZHANG, L.; FU, D.; LU, X.; WU, T.; TONG, Q. Selecting photovoltaic generation sites in Tibet using remote sensing and geographic analysis. **Solar Energy**, n. 133, p. 85-93, 2016.

WATANABE, M. D. B.; MORAIS, E. R.; CARDOSO, T. F.; CHAGAS, M. F.; JUNQUEIRA, T. L.; CARVALHO, D. J. Process simulation of renewable electricity from sugarcane straw: Technoeconomic assessment of retrofit scenarios in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, n. 254, p. 120081, 2020.

WATSON, J. J. W.; HUDSON, M. D. Regional Scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. **Landscape and Urban Planning**, n. 138, p. 20-31, 2015.

WEC (World Energy Council). **World Energy Scenarios: composing energy futures to 2050**. London: World Energy Council, 2013.

WU, Y.; XU, C.; ZHANG, T. Evaluation of renewable power sources using a fuzzy MCDM based on cumulative prospect theory: a case in China. **Energy**, n. 147, p. 1227-1239, 2018.

XU, Z. S.; DA, Q. L. An overview of operators for aggregating information. **International Journal of Intelligent Systems**, n. 18, p. 953-969, 2003.

YAZDANI M.; ALIDOOSTI A.; ZAVADSKAS E. K. Risk analysis of critical infrastructures using fuzzy Copras. **Economic Research**, v. 24, n. 4, p. 27-40, 2012.

ZAVADSKAS, E. K.; KAKLAUSKAS, A.; TURSKIS, Z.; TAMOSAITIENE, J.; KALIBATAS, D. Assessment of indoor environment applying COPRAS method with attributes determined in intervals. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE "ENVIRONMENTAL ENGINEERING**, v.7, 2008. **Proceedings [...]**, 2008. p. 907-912

ZAVADSKAS, E. K.; KAKLAUSKAS, A. Determination of an efficient contractor by using the new method of multi-criteria assessment, [in:] D. A. Langford, A. Retik (Eds.) **International Symposium for “The Organization and Management of Construction”**. *Shaping Theory and Practice*, Vol. 2, 1996: Managing the Construction Project and Managing Risk, CIB W 65; London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras, London: Eand FN SPON, pp. 94-104, 1996.

ZHANG L, ZHOU P, NEWTON S, FANG JX, ZHOU D, ZHANG L. Evaluating clean energy alternatives for Jiangsu, China: an improved multi-criteria decision making method. **Energy**, n. 90, p. 953-964, 2015.

ZERPA, J. C. R.; YUSTA, J. M. Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 52, p. 557-71, 2015.

ZOGHI, M.; EHSANI, A. H.; SADAT, M.; AMIRI, M. J.; KARIMI, S. Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 68, p. 986-996, 2017.

ZOLFANI SH, YAZDANI M, ZAVADSKAS EK. An extended stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) method for improving criteria prioritization process. **Soft Computing**, n. 22, p. 7399-740, 2018.

**APÊNDICE A - PESQUISA DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE CRITÉRIOS E
ENTRE SUBCRITÉRIOS EMPRESARIAIS**

PESQUISA DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE CRITÉRIOS E ENTRE SUBCRITÉRIOS EMPRESARIAIS

Objetivo

Esta é uma pesquisa de múltipla escolha para tomadores de decisão do setor de energia definirem a importância relativa entre critérios e entre subcritérios que foram classificados na etapa anterior desta pesquisa para a implantação de uma usina fotovoltaica.

Importância relativa entre critérios e entre subcritérios

Com o objetivo do perfeito entendimento da importância relativa entre critérios ou entre subcritérios seguem as definições de importância relativa:

- Igual importância corresponde a 0% menos importante;
- Pouco menos importante corresponde a 20% menos importante;
- Menos importante corresponde a 40% menos importante;
- Muito menos importante corresponde a 60% menos importante;
- Extremamente menos importante corresponde a 80% menos importante;
- Sem importância corresponde a 100% menos importante.

Pesquisa

Com base na “**Importância relativa entre critérios**” e nas definições abaixo, marque com um “**X**” a alternativa que você considera a mais apropriada:

1) O critério técnico é _____ critério econômico.

- () a. de igual importância ao.
- () b. pouco menos importante do que o.
- () c. menos importante do que o.

- d. muito menos importante do que o.
- e. extremamente menos importante do que o.
- f. Sem importância em relação ao.

2) O critério social é _____ critério técnico

- a. de igual importância ao.
- b. pouco menos importante do que o.
- c. menos importante do que o.
- d. muito menos importante do que o.
- e. extremamente menos importante do que o.
- f. Sem importância em relação ao.

3) O critério ambiental _____ critério social.

- a. de igual importância ao.
- b. pouco menos importante do que o.
- c. menos importante do que o.
- d. muito menos importante do que o.
- e. extremamente menos importante do que o.
- f. Sem importância em relação ao.

Com base na “**Importância relativa entre subcritérios**” e nas definições abaixo, marque com um “**X**” a alternativa que você considera a mais apropriada:

Subcritérios econômicos

- Custo de investimento: são os custos de aquisição de área, projeto, equipamentos, instalações e obras de um empreendimento;

- *PayBack*: é o período de retorno de um investimento inicial de um empreendimento quando o ganho acumulado se iguala ao valor do investimento;
- Período de projeto e construção: é o prazo entre início do projeto e a entrada em operação comercial;
- Custos da equipe de operação e manutenção (O&M): são os salários dos funcionários da operação e manutenção da usina fotovoltaica.

4) O *payback* é _____ custo de investimento.

- () a. de igual importância ao.
- () b. pouco menos importante do que o.
- () c. menos importante do que o.
- () d. muito menos importante do que o.
- () e. extremamente menos importante do que o.
- () f. Sem importância em relação ao.

5) O período de construção é _____ *payback*.

- () a. de igual importância ao.
- () b. pouco menos importante do que o.
- () c. menos importante do que o.
- () d. muito menos importante do que o.
- () e. extremamente menos importante do que o.
- () f. Sem importância em relação ao.

6) Os custos da equipe de operação e manutenção - O&M é _____ período de projeto e construção.

- () a. de igual importância ao.

- () b. pouco menos importante do que o.
- () c. menos importante do que o.
- () d. muito menos importante do que o.
- () e. extremamente menos importante do que o.
- () f. Sem importância em relação ao.

Subcritérios técnicos

- Potencial de geração de energia elétrica: é a capacidade de geração de energia anual;
- Fator de capacidade: é a relação entre a geração e a capacidade de geração em um ano;
- Disponibilidade da cadeia de suprimentos: é a disponibilidade da cadeia de transmissão e distribuição de energia elétrica.

7) O fator de capacidade é _____ potencial de geração.

- () a. de igual importância ao.
- () b. pouco menos importante do que o.
- () c. menos importante do que o.
- () d. muito menos importante do que o.
- () e. extremamente menos importante do que o.
- () f. Sem importância em relação ao.

8) A Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) é _____ fator de capacidade.

- () a. de igual importância ao.
- () b. pouco menos importante do que o.
- () c. menos importante do que o.

- () d. muito menos importante do que o.
- () e. extremamente menos importante do que o.
- () f. Sem importância em relação ao.

Subcritérios ambientais

- Emissões de CO²: são as emissões de CO² no transporte de colaboradores de operação e manutenção durante o ciclo de vida da usina fotovoltaica;
- Descarte de módulos fotovoltaicos: são os milhares de módulos fotovoltaicos constituído de materiais, tais como: vidro, alumínio, cobre, chumbo, estanho e prata, a serem descartados durante o ciclo de vida da usina fotovoltaica.

9) As emissões de CO² são _____descarte de módulos fotovoltaicos.

- () a. de igual importância ao.
- () b. pouco menos importante do que o.
- () c. menos importante do que o.
- () d. muito menos importante do que o.
- () e. extremamente menos importante do que o.
- () f. Sem importância em relação ao.

Subcritérios sociais

- Quantidade de empregos sazonais: são os empregos referentes a projeto e construção;
- Quantidade de empregos permanentes: são os empregos de operação e manutenção;
- População a ser beneficiada: é a prosperidade social da região durante o ciclo de vida da usina fotovoltaica.

10) Os empregos permanentes são _____ população a ser beneficiada.

- a. de igual importância a.
- b. pouco menos importante do que a.
- c. menos importante do que a.
- d. muito menos importante do que a.
- e. extremamente menos importante do que a.
- f. Sem importância em relação ao.

11) Os empregos sazonais são _____ empregos permanentes.

- a. de igual importância dos.
- b. pouco menos importante do que os.
- c. menos importante do que os.
- d. muito menos importante do que os.
- e. extremamente menos importante do que os.
- f. Sem importância em relação ao.

Agradeço aos participantes desta pesquisa. Cordialmente pesquisador.

APÊNDICE B - APLICAÇÃO DO MÉTODO MCDM COPRAS-F (ALTERNATIVAS)

APLICAÇÃO DO MÉTODO MCDM COPRAS-F (ALTERNATIVAS)

A partir dos resultados da pesquisa de classificações linguísticas das alternativas com tomadores de decisão (D1, D2, D3 e D4), gerou-se uma matriz linguística de alternativas (Tabelas 34, 35 e 36), sendo fuzzificada (Tabela 40, ..., 49), calculada a média fuzzy (Tabela 50, 51, 52), defuzzificada através do método do centro de área (Tabela 53), normalizada pelo somatório dos valores dos critérios defuzzificados (Tabela 54), ponderada pelo peso dos critérios defuzzificados (Tabela 55) e calculado o ranking das alternativas de locais para instalação de usinas fotovoltaicas (Tabela 56).

Tabela 40 - Matriz fuzzy da alternativa A1

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A1			A1			A1			A1		
C1	-	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,1
C2	-	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9
C3	-	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C4	-	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3
C5	+	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0
C6	+	0,5	0,7	0,9	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C8	-	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C9	-	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
C10	+	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 41 - Matriz fuzzy da alternativa A2

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A2			A2			A2			A2		
C1	-	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5
C2	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C3	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
C4	-	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5
C5	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0
C6	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5
C8	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C9	-	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C10	+	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 42 - Matriz *fuzzy* da alternativa A3

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A3			A3			A3			A3		
C1	-	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0
C2	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9
C3	-	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,1	0,3	0,5	0,9	1,0	1,0
C4	-	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,0	0,1	0,3	0,9	1,0	1,0
C5	+	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
C6	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,0	0,1	0,3	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
C8	-	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,7	0,9	1,0
C9	-	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C10	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9

Fonte: Autor (2019)

Tabela 43 - Matriz *fuzzy* da alternativa A4

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A4			A4			A4			A4		
C1	-	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0
C2	-	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
C3	-	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,1	0,3	0,5	0,9	1,0	1,0
C4	-	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
C5	+	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
C6	+	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,0	0,1	0,3	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
C8	-	0,3	0,5	0,7	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,7	0,9	1,0
C9	-	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C10	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 44 - Matriz *fuzzy* da alternativa A5

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A5			A5			A5			A5		
C1	-	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5
C2	-	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9
C3	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
C4	-	0,5	0,7	0,9	0,7	0,9	1,0	0,0	0,1	0,3	0,7	0,9	1,0
C5	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0
C6	+	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C8	-	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C9	-	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C10	+	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 45 - Matriz *fuzzy* da alternativa A6

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A6			A6			A6			A6		
C1	-	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,0	0,1	0,3
C2	-	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9
C3	-	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C4	-	0,0	0,1	0,3	0,3	0,5	0,7	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
C5	+	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,7	0,9	1,0
C6	+	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C8	-	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,7	0,9	1,0
C9	-	0,0	0,1	0,3	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C10	+	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 46 - Matriz *fuzzy* da alternativa A7

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A7			A7			A7			A7		
C1	-	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,1
C2	-	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	1,0	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9
C3	-	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C4	-	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3
C5	+	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0
C6	+	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C8	-	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,7	0,9	1,0
C9	-	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C10	+	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9

Fonte: Autor (2019)

Tabela 47 - Matriz *fuzzy* da alternativa A8

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A8			A8			A8			A8		
C1	-	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0
C2	-	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9
C3	-	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,1	0,3	0,5	0,9	1,0	1,0
C4	-	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,0	0,1	0,3	0,9	1,0	1,0
C5	+	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
C6	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
C8	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C9	-	0,7	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C10	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,9	1,0	1,0	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 48 - Matriz *fuzzy* da alternativa A9

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A9			A9			A9			A9		
C1	-	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5
C2	-	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C3	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
C4	-	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5
C5	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0
C6	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5
C8	-	0,3	0,5	0,7	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,9	1,0	1,0
C9	-	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C10	+	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 49 - Matriz *fuzzy* da alternativa A10

Critérios		Tomadores de Decisão											
		D1			D2			D3			D4		
		A10			A10			A10			A10		
C1	-	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5
C2	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9
C3	-	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
C4	-	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5
C5	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,0
C6	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C7	-	0,0	0,1	0,3	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
C8	-	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,0
C9	-	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9
C10	+	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7	0,9	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
C11	+	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,9
C12	+	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 50 - Média *fuzzy* das alternativas A1 -A2 -A3 -A4

Critérios		Média Fuzzy das Alternativas											
		D1 D2 D3 D4											
		Fuzzy Number A1			Fuzzy Number A2			Fuzzy Number A3			Fuzzy Number A4		
C1	-	0,05	0,15	0,30	0,30	0,50	0,70	0,85	0,98	1,00	0,85	0,98	1,00
C2	-	0,50	0,70	0,88	0,40	0,60	0,80	0,45	0,65	0,85	0,20	0,40	0,60
C3	-	0,30	0,50	0,70	0,45	0,65	0,83	0,65	0,80	0,88	0,65	0,80	0,88
C4	-	0,10	0,23	0,40	0,18	0,33	0,50	0,58	0,73	0,83	0,33	0,50	0,70
C5	+	0,75	0,90	0,98	0,50	0,70	0,88	0,15	0,35	0,55	0,15	0,35	0,55
C6	+	0,55	0,75	0,93	0,50	0,70	0,90	0,50	0,70	0,90	0,40	0,60	0,80
C7	-	0,40	0,60	0,78	0,03	0,08	0,20	0,18	0,35	0,55	0,18	0,35	0,55
C8	-	0,70	0,85	0,93	0,55	0,73	0,88	0,20	0,30	0,43	0,25	0,35	0,48
C9	-	0,13	0,28	0,45	0,30	0,50	0,70	0,70	0,85	0,93	0,70	0,85	0,93
C10	+	0,55	0,73	0,85	0,45	0,65	0,83	0,40	0,60	0,80	0,40	0,60	0,80
C11	+	0,65	0,83	0,95	0,50	0,70	0,90	0,50	0,70	0,90	0,50	0,70	0,90
C12	+	0,45	0,65	0,83	0,55	0,75	0,90	0,35	0,55	0,75	0,75	0,90	0,98

Fonte: Autor (2019)

Tabela 51 - Média fuzzy das alternativas A5 -A6 -A7 -A8

Critérios		Média Fuzzy das Alternativas											
		D1 D2 D3 D4											
		Fuzzy Number A5			Fuzzy Number A6			Fuzzy Number A7			Fuzzy Number A8		
C1	-	0,30	0,50	0,70	0,13	0,30	0,50	0,05	0,15	0,30	0,85	0,98	1,00
C2	-	0,55	0,75	0,90	0,55	0,75	0,90	0,55	0,75	0,90	0,50	0,70	0,88
C3	-	0,45	0,65	0,83	0,30	0,50	0,70	0,30	0,50	0,70	0,65	0,80	0,88
C4	-	0,48	0,65	0,80	0,08	0,15	0,30	0,03	0,10	0,25	0,63	0,75	0,83
C5	+	0,50	0,70	0,88	0,65	0,85	0,98	0,75	0,90	0,98	0,15	0,35	0,55
C6	+	0,60	0,78	0,93	0,60	0,78	0,93	0,60	0,78	0,93	0,50	0,70	0,90
C7	-	0,40	0,60	0,78	0,65	0,80	0,90	0,65	0,80	0,90	0,25	0,45	0,65
C8	-	0,65	0,83	0,93	0,20	0,30	0,43	0,20	0,30	0,43	0,55	0,73	0,88
C9	-	0,30	0,50	0,70	0,23	0,40	0,60	0,18	0,33	0,50	0,70	0,85	0,93
C10	+	0,45	0,65	0,83	0,45	0,65	0,83	0,55	0,73	0,85	0,40	0,60	0,80
C11	+	0,50	0,70	0,90	0,60	0,80	0,95	0,65	0,83	0,95	0,50	0,70	0,90
C12	+	0,40	0,60	0,78	0,55	0,75	0,90	0,35	0,55	0,75	0,75	0,90	0,98

Fonte: Autor (2019)

Tabela 52 - Média fuzzy das alternativas A9 -A10

Critérios		Média Fuzzy das Alternativas						
		D1 D2 D3 D4						
		Fuzzy Number A9			Fuzzy Number A10			
C1	-	0,30	0,50	0,70	0,30	0,50	0,70	
C2	-	0,30	0,50	0,70	0,45	0,65	0,85	
C3	-	0,45	0,65	0,83	0,45	0,65	0,83	
C4	-	0,18	0,33	0,50	0,18	0,33	0,50	
C5	+	0,50	0,70	0,88	0,50	0,70	0,88	
C6	+	0,50	0,70	0,90	0,50	0,70	0,90	
C7	-	0,03	0,10	0,25	0,18	0,35	0,55	
C8	-	0,30	0,40	0,53	0,75	0,88	0,93	
C9	-	0,30	0,50	0,70	0,30	0,50	0,70	
C10	+	0,45	0,65	0,83	0,45	0,65	0,83	
C11	+	0,50	0,70	0,90	0,50	0,70	0,90	
C12	+	0,45	0,65	0,83	0,80	0,93	0,98	

Fonte: Autor (2019)

Tabela 53 - Matriz defuzzificada (COA) das alternativas A1 ... A10

Critérios		Defuzzificação										Soma
		D1 D2 D3 D4										
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	
C1	-	0,17	0,50	0,94	0,94	0,50	0,31	0,17	0,94	0,50	0,50	5,47
C2	-	0,69	0,60	0,65	0,40	0,73	0,73	0,73	0,69	0,50	0,65	6,38
C3	-	0,50	0,64	0,78	0,78	0,64	0,50	0,50	0,78	0,64	0,64	6,39
C4	-	0,24	0,33	0,71	0,51	0,64	0,18	0,13	0,73	0,33	0,33	4,13
C5	+	0,88	0,69	0,35	0,35	0,69	0,83	0,88	0,35	0,69	0,69	6,39
C6	+	0,74	0,70	0,70	0,60	0,77	0,77	0,77	0,70	0,70	0,70	7,14
C7	-	0,59	0,10	0,36	0,36	0,59	0,78	0,78	0,45	0,13	0,36	4,50
C8	-	0,83	0,72	0,31	0,36	0,80	0,31	0,31	0,72	0,41	0,85	5,60
C9	-	0,28	0,50	0,83	0,83	0,50	0,41	0,33	0,83	0,50	0,50	5,50
C10	+	0,71	0,64	0,60	0,60	0,64	0,64	0,71	0,60	0,64	0,64	6,43
C11	+	0,81	0,70	0,70	0,70	0,70	0,78	0,81	0,70	0,70	0,70	7,30
C12	+	0,64	0,73	0,55	0,88	0,59	0,73	0,55	0,88	0,64	0,90	7,09

Fonte: Autor (2019)

Tabela 54 - Matriz defuzzificada normalizada das alternativas A1 ... A10

Critérios		Defuzzificação Normalizada										qj (COA)
		D1 D2 D3 D4										
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	
C1	-	0,03	0,09	0,17	0,17	0,09	0,06	0,03	0,17	0,09	0,09	0,1169
C2	-	0,11	0,09	0,10	0,06	0,11	0,11	0,11	0,11	0,08	0,10	0,1055
C3	-	0,08	0,10	0,12	0,12	0,10	0,08	0,08	0,12	0,10	0,10	0,0910
C4	-	0,06	0,08	0,17	0,12	0,16	0,04	0,03	0,18	0,08	0,08	0,0796
C5	+	0,14	0,11	0,05	0,05	0,11	0,13	0,14	0,05	0,11	0,11	0,1117
C6	+	0,10	0,10	0,10	0,08	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,0941
C7	-	0,13	0,02	0,08	0,08	0,13	0,17	0,17	0,10	0,03	0,08	0,0476
C8	-	0,15	0,13	0,06	0,06	0,14	0,06	0,06	0,13	0,07	0,15	0,0538
C9	-	0,05	0,09	0,15	0,15	0,09	0,07	0,06	0,15	0,09	0,09	0,0951
C10	+	0,11	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,09	0,10	0,10	0,0569
C11	+	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,0631
C12	+	0,09	0,10	0,08	0,12	0,08	0,10	0,08	0,12	0,09	0,13	0,0848

Fonte: Autor (2019)

Tabela 55 - Matriz defuzzificada normalizada ponderada das alternativas A1 ... A10

Critérios		Matriz de Decisão Defuzzificada Normalizada Ponderada										
		D1 D2 D3 D4										
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	
C1	-	0,004	0,011	0,020	0,020	0,011	0,007	0,004	0,020	0,011	0,011	0,011
C2	-	0,011	0,010	0,011	0,007	0,012	0,012	0,012	0,011	0,008	0,011	0,011
C3	-	0,007	0,009	0,011	0,011	0,009	0,007	0,007	0,011	0,009	0,009	0,009
C4	-	0,005	0,006	0,014	0,010	0,012	0,003	0,002	0,014	0,006	0,006	0,006
C5	+	0,015	0,012	0,006	0,006	0,012	0,014	0,015	0,006	0,012	0,012	0,012
C6	+	0,010	0,009	0,009	0,008	0,010	0,010	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009
C7	-	0,006	0,001	0,004	0,004	0,006	0,008	0,008	0,005	0,001	0,004	0,004
C8	-	0,008	0,007	0,003	0,003	0,008	0,003	0,003	0,007	0,004	0,008	0,008
C9	-	0,005	0,009	0,014	0,014	0,009	0,007	0,006	0,014	0,009	0,009	0,009
C10	+	0,006	0,006	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,005	0,006	0,006	0,006
C11	+	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006
C12	+	0,008	0,009	0,007	0,010	0,007	0,009	0,007	0,010	0,008	0,011	0,011

Fonte: Autor (2019)

Tabela 56 - Ranking COPRAS-F das alternativas

Cálculos e Ranking						
Alternativas	Pi Soma dos Critérios de Benefício (Maximização)	Ri- Soma dos Critérios de Custo (Minimização)	1/Ri	Qi Pesos Relativos das Alternativas	Ui Prioridades das Alternativas	Ranking
A1	0,046	0,046	21,81	0,118	0,956	2
A2	0,042	0,053	18,96	0,105	0,846	5
A3	0,033	0,077	13,06	0,076	0,619	10
A4	0,036	0,069	14,48	0,084	0,678	8
A5	0,041	0,067	14,95	0,090	0,732	7
A6	0,046	0,048	21,05	0,115	0,934	3
A7	0,045	0,042	23,69	0,124	1,000	1
A8	0,037	0,083	12,10	0,077	0,625	9
A9	0,041	0,048	20,66	0,109	0,882	4
A10	0,044	0,058	17,37	0,101	0,819	6
		0,589	178,13			

Fonte: O Autor (2019)

APÊNDICE C -WEIGHTED SUM METHOD (SAW)

WEIGHTED SUM METHOD (SAW)

Em função das planilhas de cálculos (Tabela 57) estarem em conformidade com as formulas apresentadas no capítulo 3, não se apresentou novamente as equações, optando por comentários no cabeçalho das planilhas sobre a operação executada.

Tabela 57 - Planilhas de cálculos do método SAW

Matriz de Tomada de Decisão													
Critério i	Z	Medidas	Pesos	Alternativas j									
				Peabiru	Reserva	Goioxim	Lapa	Terra Rica	Alvorada do Sul	Sertaneja	Terra Roxa	Ivaí	Salto do Lontra
1	-	Milhões R\$	0,098	26,55	15,93	5,31	5,31	15,93	21,24	26,55	5,31	15,93	15,93
2	-	Meses	0,089	188	198	197	218	183	183	185	190	202	191
3	-	Meses	0,068	18	15	12	12	15	18	18	12	15	15
4	-	R\$	0,051	28180	21948	13504	17990	15300	31164	38955	12642	21948	23178
5	+	GWh/ano	0,108	8,47	4,82	1,62	1,46	5,21	6,95	8,61	1,68	4,73	4,99
6	+	%	0,098	14,49	13,74	13,86	12,49	14,86	14,86	14,74	14,36	13,49	14,24
7	-	Minutos	0,072	23	97	44	44	21	9	10	34	73	43
8	-	Ton/Mês	0,092	0,19	0,48	1,92	1,28	0,21	1,38	1,55	0,48	1,12	0,09
9	-	Número	0,101	25665	15399	5133	5133	15399	20532	25665	5133	15399	15399
10	+	Colaboradores	0,062	14	12	10	10	12	12	14	10	12	12
11	+	Colaboradores	0,074	5	3	2	2	3	4	5	2	3	3
12	+	Habitantes	0,086	13000	25000	8000	45000	15000	22000	5000	47000	13000	50000

Matriz de Tomada de Decisão de Benefício = (Valor Máximo do Critério + Valor Mínimo do Critério) - Valor do Critério													
Critério i	Z	Pesos	Alternativas j										
			Peabiru	Reserva	Goioxim	Lapa	Terra Rica	Alvorada do Sul	Sertaneja	Terra Roxa	Ivaí	Salto do Lontra	
1	+	0,098	5,31	15,93	26,55	26,55	15,93	10,62	5,31	26,55	15,93	15,93	15,93
2	+	0,089	214	203	205	183	218	218	217	212	200	210	210
3	+	0,068	12	15	18	18	15	12	12	18	15	15	15
4	+	0,051	23417	29649	38093	33607	36297	20433	12642	38955	29649	28419	28419
5	+	0,108	8,47	4,82	1,62	1,46	5,21	6,95	8,61	1,68	4,73	4,99	4,99
6	+	0,098	14,49	13,74	13,86	12,49	14,86	14,86	14,74	14,36	13,49	14,24	14,24
7	+	0,072	83	9	62	62	85	97	96	72	33	63	63
8	+	0,092	1,82	1,54	0,09	0,73	1,80	0,63	0,46	1,53	0,89	1,92	1,92
9	+	0,101	5133	15399	25665	25665	15399	10266	5133	25665	15399	15399	15399
10	+	0,062	14	12	10	10	12	12	14	10	12	12	12
11	+	0,074	5	3	2	2	3	4	5	2	3	3	3
12	+	0,086	13000	25000	8000	45000	15000	22000	5000	47000	13000	50000	50000

Obs.: (Aplicar só nos Custos)

Matriz de Tomada de Decisão Normalizada = (Valor do Critério de Benefício / Soma dos Valores dos Critérios Benefícios)													
Critério i	Z	Pesos	Alternativas j										
			Peabiru	Reserva	Goioxim	Lapa	Terra Rica	Alvorada do Sul	Sertaneja	Terra Roxa	Ivaí	Salto do Lontra	
1	Custo de Investimento	+	0,098	0,0323	0,0968	0,1613	0,1613	0,0968	0,0645	0,0323	0,1613	0,0968	0,0968
2	Payback	+	0,089	0,1026	0,0977	0,0986	0,0882	0,1049	0,1049	0,1042	0,1019	0,0959	0,1011
3	Período de Construção	+	0,068	0,0800	0,1000	0,1200	0,1200	0,1000	0,0800	0,0800	0,1200	0,1000	0,1000
4	Custo da Equipe de O&M	+	0,051	0,0804	0,1018	0,1308	0,1154	0,1247	0,0702	0,0434	0,1338	0,1018	0,0976
5	Potencial de Geração de Energia Elétrica	+	0,108	0,1744	0,0992	0,0334	0,0301	0,1074	0,1432	0,1774	0,0346	0,0974	0,1029
6	Fator de Capacidade	+	0,098	0,1027	0,0973	0,0982	0,0885	0,1053	0,1053	0,1044	0,1018	0,0956	0,1009
7	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC)	+	0,072	0,1254	0,0136	0,0937	0,0937	0,1284	0,1465	0,1450	0,1088	0,0498	0,0952
8	Emissão Mensal de CO2 no Transporte	+	0,092	0,1596	0,1346	0,0075	0,0640	0,1582	0,0553	0,0401	0,1339	0,0779	0,1688
9	Descarte de Placas	+	0,101	0,0323	0,0968	0,1613	0,1613	0,0968	0,0645	0,0323	0,1613	0,0968	0,0968
10	Quantidade de Empregos Sazonais	+	0,062	0,1186	0,1017	0,0847	0,0847	0,1017	0,1017	0,1186	0,0847	0,1017	0,1017
11	Quantidade de Empregos Permanentes	+	0,074	0,1563	0,0938	0,0625	0,0625	0,0938	0,1250	0,1563	0,0625	0,0938	0,0938
12	População a ser beneficiada	+	0,086	0,0535	0,1029	0,0329	0,1852	0,0617	0,0905	0,0206	0,1934	0,0535	0,2058
SAW - Soma dos Valores de Critérios Versus Pesos dos critérios			0,1013	0,0956	0,0891	0,1043	0,1060	0,0960	0,0876	0,1165	0,0883	0,1143	
Ranking SWARA-SAW			5	7	8	4	3	6	10	1	9	2	

Fonte: O Autor (2019)

APÊNDICE D - COMPATIBILIDADE DE JULGAMENTO DE DECISORES

Tabela 58 - Compatibilidade nos julgamentos de decisores (SWARA)

Ranking dos critérios						
Expert k = 1, 2, ..., 4 (r = 4) - Efficiency attribute rank values, t _{jk} ; j = 1, ..., n n = 4						
Especialistas	k = 1, 2, ..., 4 (r = 4)	C1 Econômico	C2 Técnico	C3 Ambiental	C4 Social	
	1	3	4	2	1	
	2	4	3	1	2	
	3	4	3	1	2	
	4	4	3	1	2	
Estatísticas		C1	C2	C3	C4	Soma
Média	$\bar{t}_j = \frac{\sum_{k=1}^r t_{jk}}{r}$	15 3,750	13 3,250	5 1,250	7 1,750	40
Ranking t _j		1	2	4	3	10
Peso	$q_j = \frac{\bar{t}_j}{\sum_{j=1}^n \bar{t}_j}$	0,375	0,325	0,125	0,175	
		0,563	0,563	0,563	0,563	
		0,063	0,063	0,063	0,063	
		0,063	0,063	0,063	0,063	
	$\sum_{k=1}^r (t_{jk} - \bar{t}_j)^2$	0,063	0,063	0,063	0,063	
		0,75	0,75	0,75	0,75	
Dispersão do valor do ranking dos especialistas						
	$\sigma^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{k=1}^r (t_{jk} - \bar{t}_j)^2$	0,25	0,25	0,25	0,25	
Variação $\beta_j = \frac{\sigma}{\bar{t}_j}$						
		0,133	0,154	0,400	0,286	
Valor médio da soma do Ranking (V)						
	$V = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk}$	40/4 = 10				
Desvio ao quadrado da soma total do Ranking (S)						
	$S = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^r t_{jk} - V \right]^2$	(15-10) ² + (13-10) ² + (5-10) ² + (7-10) ² = 68				
Coeficiente de concordância (W)						
	$W = \frac{12S}{r^2(n^3 - n)}$	(12x68) / (4 ² x (4 ³ -4)) = 0,85				
Significância do coeficiente de concordância - (sem ranks relacionados $\chi_{\alpha,v}^2$)						
	$\chi_{\alpha,v}^2 = \frac{12S}{r \cdot n(n+1) - \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^r T_k}$	(12x68) / (4x4x5-0) = 10				
Ranking da tabela de concordância χ_{tbl}^2 quando a importância é igual a 1%						
Graus de liberdade de um problema resolvido, v		4 - 1 = 3				
Compatibilidade $\chi_{\alpha,v}^2$ do julgamento dos especialistas (Kendall 1970)		10	> 7,815 para $\alpha = 0,05$ com grau de liberdade 3 da Tabela Qui-Quadrado. A hipótese sobre concordância do ranking entre especialista é aceita.			

Fonte: O Autor - (2021)