



## **Grupo de Estudo de Sistemas de Distribuição-GDI**

### **Análise Espacial da Aptidão para Instalação de Sistemas Fotovoltaicos em Telhados Residenciais Utilizando Lógica Fuzzy**

**DIEGO MARCOCHI DE MELO(1); PATRÍCIA TEIXEIRA LEITE ASANO(1); JOEL DAVID MELO TRUJILLO(1); UFABC(1);**

#### **RESUMO**

A introdução de novas fontes renováveis para a geração de energia elétrica em diversos países tem ganhado destaque diante de um contexto mundial de insegurança no atendimento da demanda e aumento dos impactos ambientais causados por atividades humanas. No Brasil, o setor residencial é o segundo maior consumidor de energia elétrica, o que reforça o desafio da criação de políticas e incentivos que visem o suprimento desse significativo consumidor. Diante do exposto, a geração distribuída ganhou importância recentemente no cenário nacional como maneira complementar de aumento da oferta de energia elétrica. Nesse contexto, destaca-se a geração de energia elétrica através de painéis solares alocados nos telhados de domicílios residenciais. Em relação aos sistemas fotovoltaicos alocados em telhados, grande parte dos estudos apresentados até então concentram os seus esforços na mensuração do potencial energético disponível na área de estudo. Dessa forma, este Informe Técnico tem como objetivo apresentar uma ferramenta baseada em lógica *fuzzy* e Sistema de Informações Geográficas com propósito de estimar a aptidão de uma determinada área para a instalação de sistemas fotovoltaicos em telhados residenciais. Na avaliação do estudo de caso adotado, foram consideradas três grandezas de um sistema teste real: o nível de irradiação solar, a área aproveitável de telhado para a instalação dos sistemas fotovoltaicos e a viabilidade econômica de instalação dos sistemas. Finalizando, a ferramenta também adotou um modelo de análise espacial, que proporciona bons resultados qualitativos e quantitativos que permitirão subsidiar a tomada de decisão durante o planejamento de sistemas de energia elétrica.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Lógica *fuzzy*, Aptidão Fotovoltaica, Análise Espacial.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

No Brasil, fatores de importância têm reforçado o destaque à fonte solar fotovoltaica. Como exemplo, cita-se a diminuição dos custos da energia solar fotovoltaica em comparação com outras fontes (FGV, 2018), a evolução do aumento do preço da tarifa de energia elétrica ao longo últimos anos (EPE, 2018) e o advento de novos marcos regulatórios (ANEEL, 2015). Dados da ANEEL mostram um aumento na evolução do número de conexões de geração distribuída (GD) a partir de 2012, com grande prevalência das usinas fotovoltaicas do tipo residencial (GREENER, 2019).

O crescimento da GD em zonas urbanas tem sido visto como uma alternativa auxiliar no suprimento da demanda elétrica local. Dessa forma, torna-se importante a realização de estudos que visam determinar o potencial solar a

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517 – Email: [diego.marcochi@ufabc.edu.br](mailto:diego.marcochi@ufabc.edu.br)

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

ser instalado, pois isto ajudará a definir os novos planos de expansão da geração centralizada, assim como os planos de operação das redes elétricas.

Atualmente, grande parte dos estudos se debruça apenas sobre a estimação do potencial fotovoltaico de uma região, além de outros poucos que trabalham sobre estudos de viabilidade econômica de projetos de energia solar fotovoltaico. Outros, porém, realizam uma análise probabilística das regiões que podem instalar sistemas energéticos, tais como eólicos e fotovoltaicos (GASTELU, TRUJILLO & PADILHA-FELTRIN, 2018) (CARDOSO DE LIMA, 2015) (CARDOSO DE LIMA *et al.*, 2018) (LIMA, 2017). No entanto, as características qualitativas não são consideradas em tal processo de estimativa. As características qualitativas podem ajudar na melhor classificação das regiões com aptidão para instalação de sistemas fotovoltaicos, como será mostrado neste informe.

Dessa forma, este Informe Técnico tem como objetivo apresentar uma ferramenta baseada em lógica *fuzzy* e implementada em Sistema de Informações Geográficas (SIG) com propósito de estimar a aptidão de uma determinada área para a instalação de sistemas fotovoltaicos em telhados residenciais. Na avaliação foram consideradas três grandezas: o nível de irradiação solar, a área aproveitável de telhado para a instalação dos sistemas fotovoltaicos e a viabilidade econômica de instalação dos sistemas. Consequentemente, buscou-se representar através de um modelo de análise espacial as preferências dos habitantes à instalação destes sistemas. Os resultados alcançados mostram o potencial da ferramenta implementada no auxílio ao planejamento de sistema elétrico de distribuição, pois a mesma pode auxiliar na indicação de potenciais consumidores, subsidiar a avaliação por parte das concessionárias das mudanças técnicas decorrentes de novas instalações, bem como fornecer informações para os estudos de previsão de carga.

## 2.0 - APLICAÇÃO DA LÓGICA *FUZZY* PARA ESTIMAÇÃO DA APTIDÃO

Através de um levantamento bibliográfico pôde-se perceber que alguns estudos passaram a utilizar técnicas inteligentes para auxiliar o suporte à decisão na indicação de áreas aptas a instalação de sistemas fotovoltaicos. Destacam-se, neste caso, o uso de lógica *fuzzy* (CARDOSO DE LIMA *et al.*, 2018) (ASAKEREH; SOLEYMANI; SHEIKHDAVOODI, 2017) (LOPES, 2019) e redes neurais (MAINZER *et al.*, 2017).

A lógica *fuzzy* mostra-se interessante dada as suas particularidades de caracterização mais ampla, onde elementos são classificados em função dos graus de pertinência<sup>1</sup> em relação ao conjunto, diferenciando da abordagem clássica, onde um elemento pode assumir apenas um valor de verdadeiro ou falso (LOPES, 2019).

Outra característica importante da lógica *fuzzy* diz respeito ao uso de representações através de conceitos vagos ou imprecisos, aproximando-se bastante da forma humana de pensar. Exemplos desses conceitos são os termos utilizados para descrever a aptidão neste informe, como "baixo", "médio", "alto". Esses conceitos são representados por termos subjetivos, e referem-se ao grau de pertinência associado.

Adicionalmente, a lógica *fuzzy* possibilita a adoção de limites imprecisos entre os termos, geralmente associados a sobreposições que garantem com que um determinado elemento possa estar associado a mais de um termo subjetivo, diferenciando apenas a pertinência entre esses termos.

Dada essas características, a lógica *fuzzy* mostra um grande potencial para casos onde envolvam várias variáveis difíceis de serem associadas, além do fato da necessidade de resultados mais compreensíveis e que facilitem o apoio à decisão.

## 3.0 - ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ESPACIAIS

A ideia da utilização de uma análise exploratória de dados espaciais no presente informe se dá pela necessidade de caracterização da preferência dos habitantes quanto à instalação de sistemas fotovoltaicos alocados em telhados residenciais.

<sup>1</sup> O grau de pertinência de um determinado elemento refere-se o quanto é possível para esse elemento pertencer a um determinado conjunto, sendo esse valor representado no intervalo [0,1].

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517 – Email: diego.marcochi@ufabc.edu.br

Nesse sentido, a análise espacial propõe-se a caracterizar a influência das regiões vizinhas em cada área de estudo, analisando os graus de dependência da variável adotada em relação a sua distribuição no espaço geográfico, mostrando o quanto o valor desta variável é dependente dos valores desta mesma variável para as regiões vizinhas.

Neste Informe Técnico, a variável a ser estudada pela análise espacial é a aptidão para instalação de sistemas fotovoltaicos em telhados residenciais, que consiste na capacidade ou vocação que uma determinada área apresenta para a instalação de sistemas fotovoltaicos nos telhados de seus domicílios residenciais.

O estudo da dependência espacial de regiões geográficas, tais como municípios, estados, distritos ou setores censitários, pode ser efetuado através da análise a partir do diagrama de espalhamento de Moran (CARVALHO *et al.*, 2004), que consiste em uma forma de analisar o comportamento da covariância da variável da área de interesse em relação às áreas vizinhas.

O diagrama de espalhamento de Moran, segundo Carvalho *et al.* (2004), é uma forma adicional de visualização da dependência espacial. Ele consiste na plotagem dos valores normalizados ( $Z$ ) (valor do atributo subtraído de sua média e dividido pelo desvio-padrão) e dos valores normalizados da média dos vizinhos da área ( $WZ$ ). A Figura 1 apresenta o diagrama.

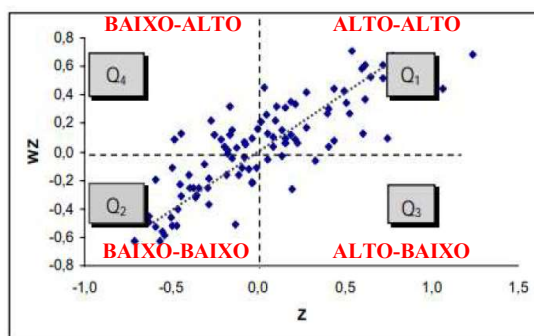


Figura 1 – Diagrama de espalhamento de Moran  
Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2004)

O diagrama de espalhamento de Moran é dividido em quatro quadrantes, tendo como valor para o eixo X o valor normalizado  $Z_i$ , e no eixo Y o valor da média dos vizinhos normalizado  $\hat{\mu}_i$ , denominada  $WZ$  na Figura 1.

O quadrante denominado Q1 da Figura 1 é a região onde os valores  $Z_i$  e de  $WZ$  estão acima da média global, dessa forma a região é denominada Alto-Alto. Seguindo a mesma lógica, os quadrantes Q2, Q3 e Q4 são, respectivamente:  $Z_i$  e  $WZ$  abaixo da média global (Baixo-Baixo);  $Z_i$  acima e  $WZ$  abaixo da média global (Alto-Baixo) e  $Z_i$  abaixo e  $Z_i$  e  $WZ$  acima da média global (Baixo-Alto).

Assim sendo, quanto mais distantes da média, mais diferentes são os valores da variável da área  $i$  em relação à média de todos os valores da área. E conforme o diagrama de espalhamento de Moran (Figura 1), esses valores podem ser positivos (Alto) ou negativos (Baixo).

O valor normalizado ( $Z_i$ ), assim como o valor normalizado da média dos vizinhos ( $\hat{\mu}_i$ ) são calculados a partir das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$Z_i = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma} \quad (1)$$

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517– Email: diego.marcochi@ufabc.edu.br

Os autores agradecem a INCT-INNERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

onde:  $y_i$  é o valor do atributo considerado na área  $i$ ,  $\bar{y}$  representa o valor médio do atributo na região de estudo,  $\sigma$  é o desvio-padrão amostral.

$$\hat{\mu}_i = \sum_{j=1}^n \omega_{ij} * Z_i \quad (2)$$

onde:  $n$  é o número de áreas,  $\omega_{ij}$  representa os elementos da matriz normalizada de proximidade espacial,  $Z_i$  é o valor do atributo da área  $i$  normalizado.

A variável  $\hat{\mu}_i$  também pode ser chamada de média móvel, que corresponde a uma forma simples de verificar a variação da tendência espacial a partir da média dos valores dos vizinhos (CARVALHO *et al.*, 2004).

Baseado neste contexto, as áreas que serão influenciadas a partir dos valores oriundos da análise espacial serão as regiões que possuem baixa aptidão com vizinhos que possuem altas aptidões (Baixo-Alto), assim como as regiões que já possuem alta aptidão com vizinho que possuem altas aptidões (Alto-Alto).

#### 4.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta pode ser implementada em qualquer Sistema de Informações Geográficas, desde que o mesmo tenha um módulo que permita a execução da lógica *fuzzy*.

Os procedimentos metodológicos foram divididos em quatro passos baseados nos processamentos da lógica *fuzzy*, conforme exibido pela Figura 2.

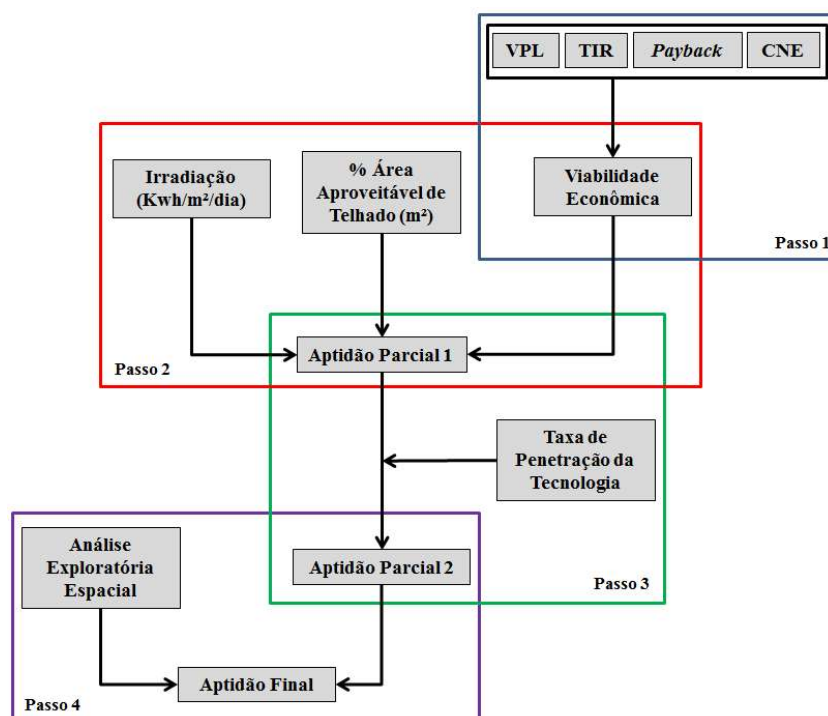


Figura 2 – Quadro esquemático da metodologia

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517– Email: diego.marcochi@ufabc.edu.br

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

Fonte: Autoral

O primeiro passo consisti no processamento para o cálculo da variável "Viabilidade Econômica" ( $VE_{con}$ ) a partir da fuzzificação dos dados de entrada: Valor Presente Líquido (VPL), *Payback*, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Custo Nivelado da Energia (CNE). Os valores de saída da defuzzificação deste passo foram utilizados no passo seguinte.

O segundo passo realizou o processamento e cálculo da variável "Aptidão Parcial 1" ( $Apt_{P1}$ ), que se trata da aptidão sem considerar a função "Taxa de Penetração da Tecnologia" e sem a realização da análise exploratória de dados espaciais, que serão realizadas nos passos posteriores. Os dados de entrada utilizados nesse passo foram a "Irradiação Solar" (*Irrad*), o "Percentual de Área Aproveitável de Telhado" ( $P_{AptT}$ ) e a "Viabilidade Econômica" ( $VE_{con}$ ).

Já no terceiro passo utilizou-se os valores de saída da função exponencial "Taxa de Penetração da Tecnologia", apresentada por Gastelu (2015), multiplicados pelos valores *crisp* de saída da lógica *fuzzy* da função "Aptidão Parcial 1", resultando em novos valores de aptidão denominada "Aptidão Parcial 2" ( $Apt_{P2}$ ).

Por fim, no último passo, a partir de um estudo de dependência espacial local para a variável "Aptidão Parcial 2", foram processados no passo quatro os valores de duas variáveis de entrada resultantes da análise espacial, denominadas *MoranSTD* e *MoranLAG*, que correspondem, respectivamente, aos valores de  $Z_i$  e  $WZ$  da Figura 1, juntamente com os valores da "Aptidão Parcial 2", resultando nos valores da "Aptidão Final" ( $Apt_F$ ).

## 5.0 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A aplicação da metodologia foi realizada através do software QGIS, versão 2.18.14 (QGIS, 2018). Foi escolhido como área de estudo um município de médio porte, localizado na região noroeste do estado de São Paulo, que também foi utilizado por Gastelu (2015). A área de estudo (Figura 3) diz respeito aos limites geográficos dos setores censitários, divisões intramunicipais, conforme IBGE (2018a), e é composta por um total de 299 setores censitários, sendo 9 destes denominados "Regiões Não Analisadas", devido ao fato destes setores apresentarem valores nulos para os dados do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2018b).

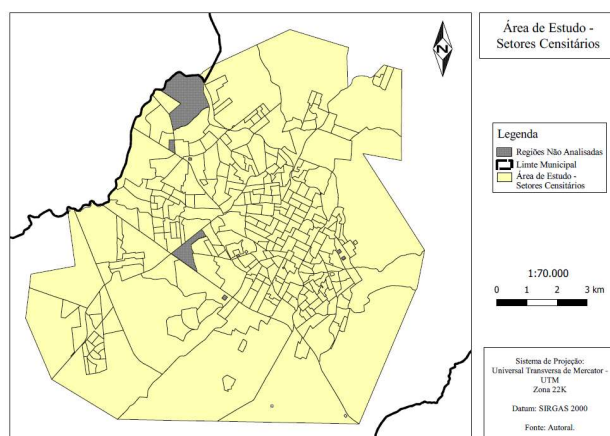


Figura 3 – Área de estudo dividida em setores censitários  
Fonte: Autoral

Para cada um dos passos que aplicam a lógica *fuzzy* (passos 1, 2 e 4), foram construídas funções de pertinências de entrada para as variáveis mencionadas, assim como as funções de pertinências de saída e os blocos de regras de inferência, que são necessários para a execução das etapas de fuzzificação, inferência e defuzzificação, respectivamente.

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517– Email: diego.marcochi@ufabc.edu.br

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

Adotou-se a construção de funções de pertinência do tipo trapezoidal, assim como o método do centro de massa (centroide) para as etapas de defuzzificação.

Nas figuras 4a, 4b, 4c e 4d são exibidas as três funções de pertinência de entrada das variáveis “Irradiação Solar”, “Percentual de Área Aproveitável de Telhado” e “Viabilidade Econômica”, assim como a função de pertinência de saída “Aptidão Parcial 1” do passo 2.

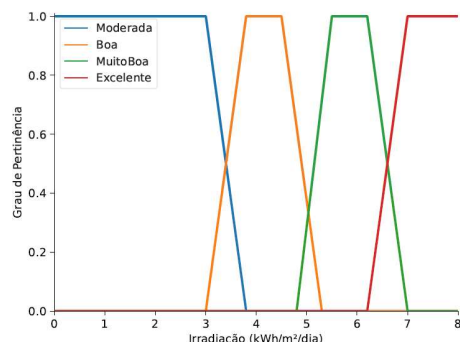


FIGURA 4 - (a) Função de Pertinência – Entrada – Irradiação

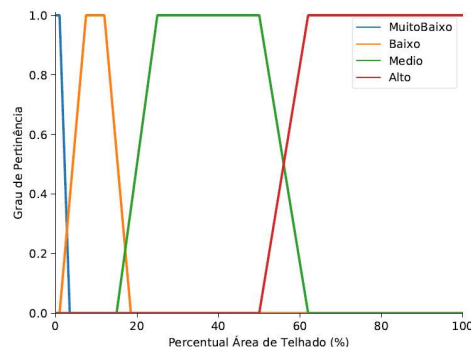


FIGURA 4 - (b) Função de Pertinência – Entrada – Percentual Área de Telhado

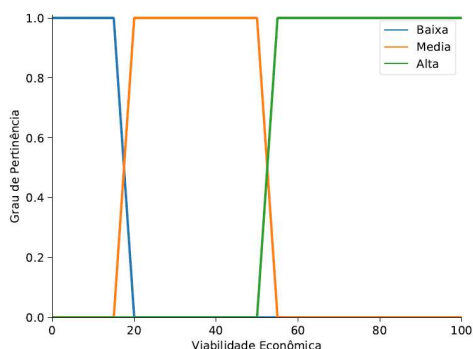


FIGURA 4 - (c) Função de Pertinência – Entrada – Viabilidade Econômica

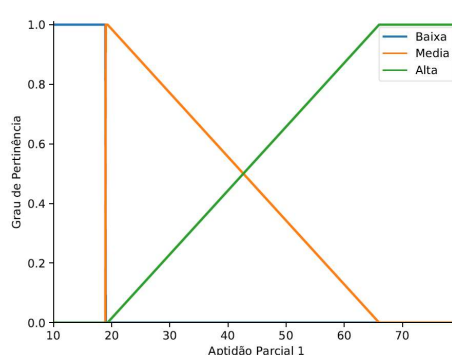


FIGURA 4 - (d) Função de Pertinência – Saída – Aptidão Parcial 1

Fonte: Autoral

Os conjuntos de regras de inferência adotados são expressos através de declarações do tipo SE-ENTÃO, utilizando como base o conectivo "E". Nesse caso, a sintaxe presente na regra estabelecida obedecerá a sentença: "SE x é A E y é B, ENTÃO C". Como exemplo, a sintaxe adotada para a regra 1 expressa na Tabela 1 será: SE ( $Irrad = \text{"Moderada"}$ ) E ( $P_{AptP1} = \text{"Muito Baixo"}$ ) E ( $VEcon = \text{"Baixa"}$ ), ENTÃO ( $Apt_{P1} = \text{"Baixa"}$ ).

Um extrato das regras de inferência de 1 a 6 adotadas no passo 2 para o processamento da Aptidão Parcial 1 são exibidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Regras de 1 a 6 do passo 2

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517– Email: [diego.marcochi@ufabc.edu.br](mailto:diego.marcochi@ufabc.edu.br)

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

Regra	SE		ENTÃO	
	<i>Irrad</i>	$P_{AAprT}$	$VEcon$	$Apt_{P1}$
1	Moderada	Muito Baixo	Baixa	Baixa
2	Moderada	Muito Baixo	Média	Baixa
3	Moderada	Muito Baixo	Alta	Baixa
4	Moderada	Baixo	Baixa	Baixa
5	Moderada	Baixo	Média	Baixa
6	Moderada	Baixo	Alta	Baixa

No passo 1 foram construídas 36 regras. No passo 2 trabalhou-se com 48 regras e no terceiro foram utilizadas 27 regras.

### 5.1 Resultados da Análise Espacial

Os resultados da análise espacial são exibidos nas Figuras 5 e 6 correspondem, respectivamente, ao diagrama de espalhamento de Moran e ao Mapa de Clusters dos setores censitários da área de estudo.

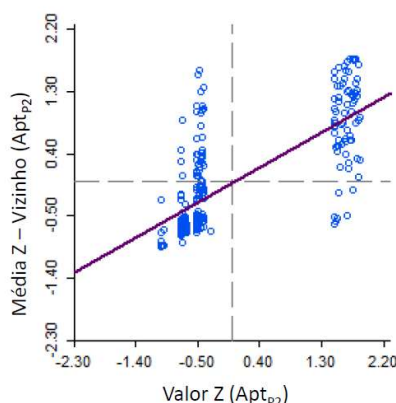


Figura 5 – Função de Pertinência – Saída – Aptidão Parcial 1  
Fonte: Autoral

Na Figura 5 são apresentados os pontos plotado em azul que correspondem aos setores censitários da área de estudo, segundo os valores das variáveis *MoranSTD* (eixo X) e *MoranLAG* (eixo Y). A reta exibida em roxo corresponde a reta de regressão cujo valor de sua inclinação indica o coeficiente de regressão linear.

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517– Email: [diego.marcochi@ufabc.edu.br](mailto:diego.marcochi@ufabc.edu.br)

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

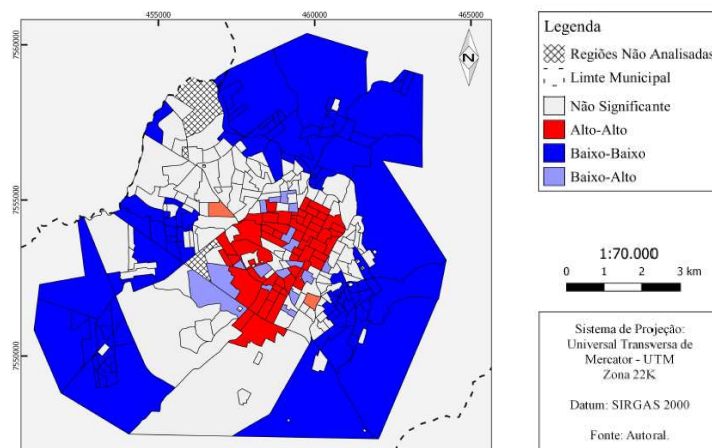


Figura 6 – Mapa de Clusters  
Fonte: Autoral

O Mapa de Clusters (Figura 6) exibe os conjuntos de áreas com suas respectivas classificações para a posição no diagrama de espalhamento de Moran, ou seja, indicará os setores classificados como Alto-Alto para o primeiro quadrante do diagrama (Q1), Alto-Baixo para o segundo quadrante (Q2), Baixo-Alto para o terceiro quadrante (Q3) e Baixo-Baixo para o quarto quadrante (Q4).

Observa-se na Figura 6 que um total de 53 setores censitários foram classificados como Alto- Alto, 97 como Alto-Baixo, 17 como Baixo-Alto e 2 como Baixo-Baixo. É possível verificar visualmente a ocorrência dos clusters Alto-Alto localizados em vermelho na região central da área de estudo, e de clusters Baixo-Baixo nas regiões periféricas. Os setores Baixo-Alto e Alto-Baixo identificados são regiões significativas de transição entre os clusters Alto-Alto e Baixo-Baixo, que estão presentes ao redor da região central.

## 5.2 Resultados da Aptidão Final

O mapa de Aptidão Final classificado em categorias de aptidão (Baixa, Média, Alta) é apresentado na Figura 7b, assim como o resultado obtido por Gastelu (2015) na Figura 7a.

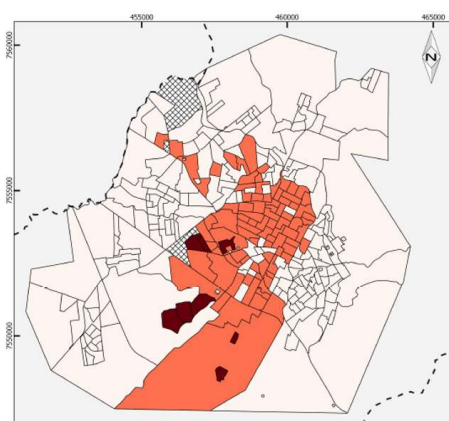


FIGURA 7 - (a) Probabilidades em categorias (GASTELU, 2015)

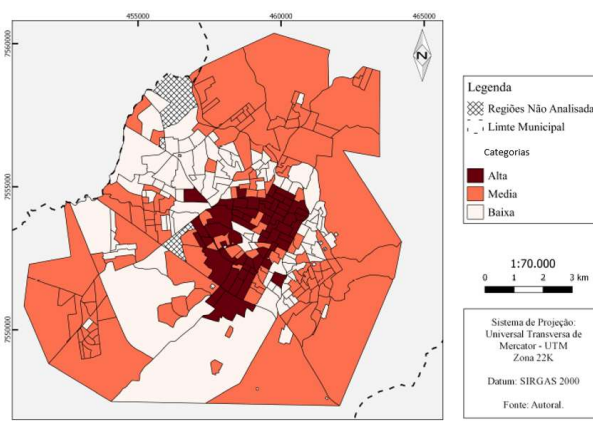


FIGURA 7 - (b) Aptidão Final em categorias utilizando lógica fuzzy

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados nº 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517– Email: diego.marcochi@ufabc.edu.br

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

Os resultados da Aptidão Final são apresentados respeitando uma mesma escala de cores, assim como preservando os mesmos intervalos de classificação, a fim de que possam ser comparados. Percebe-se a partir da Figura 7b que a classe "Alta" de Aptidão Final se encontra concentrada na região central da área de estudo. As regiões mais periféricas localizadas a sudoeste, sudeste e nordeste apresentam classe de Aptidão Final "Média" e as demais regiões apresentaram classificação categórica "Baixa".

O mapa de Probabilidades em categorias (Figura 7a) apresentou alguns setores classificados como "Alta" nas regiões central e sul, enquanto um número relativo de setores classificados como "Média" nas regiões central e sul, tendo os demais setores classificados como "Baixa".

A característica de heterogeneidade identificada no mapa de Aptidão Final em categorias pode ser explicada no caso do estudo por duas razões: a primeira diz respeito à análise espacial realizada, que segundo as regras de inferência e as funções de pertinência construídas tem uma pequena influência nos agrupamentos Baixo-Baixo, que são as regiões periféricas da área de estudo; a segunda diz respeito às características da lógica *fuzzy*, que possui a propriedade de ser mais inclusiva, ou seja, a lógica *fuzzy* tenderá a analisar todas as regiões sem excluir nenhuma área, pois por menores que sejam as pertinências das áreas, cada área sempre terá um grau de pertinência associado às classes linguísticas.

Adicionalmente, as características das funções de pertinência presentes na lógica *fuzzy* também auxiliam na explicação, pois estas permitem que uma determinada área tenha graus de pertinência diferentes para diferentes classes linguísticas. Como exemplo, pode-se apontar o fato de que uma determinada região pode receber mais de um valor de pertinência, ou seja, ela possa pertencer com um determinado grau a classe "Alta" e com outro grau diferente a classe "Média".

A Figura 8 apresenta o mapa de Aptidão Final quantitativo em valores de pertinência. O mapa foi classificado em cinco intervalos, segundo o método de classificação por Quebras Naturais, apresentando escala de cores variando entre o vermelho para os maiores valores e amarelo para os menores valores.

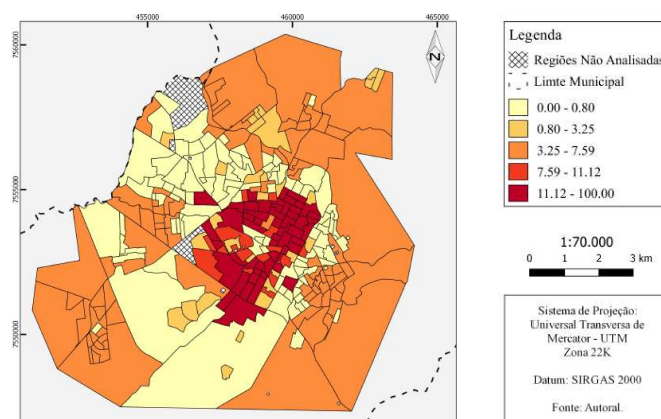


FIGURA 8 – Resultado da Aptidão Final em valores de pertinência

Finalizando, pôde-se observar que a Figura 8 apresenta os maiores valores de aptidão na região central da área de estudo. Valores intermediários entre 3,25 a 7,59 apresentam-se nas regiões periféricas e a oeste e as demais regiões apresentam valores de aptidão inferiores a 1,00.

### 5.3 Análise para Aplicação Real

A ferramenta apresentada pode ser aplicada a qualquer região geográfica, dada às características de utilização de dados provenientes de fontes abertas e públicas. Dessa forma, para um exemplo de aplicação real, os dados

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados nº 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517 – Email: diego.marcochi@ufabc.edu.br

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

necessários de irradiação solar, percentual de área aproveitável de telhado e viabilidade econômica já estariam disponíveis na ferramenta, sendo necessária apenas a definição da região geográfica de análise.

Em um segundo momento, o usuário deverá definir os parâmetros necessários para a aplicação da lógica *fuzzy*, tais como a definição das funções de pertinência de entrada e saída, assim como as regras de inferência e o tipo de defuzzificação requerida.

Por fim, os resultados seriam disponibilizados através de mapas de saída de aptidão em valores de pertinência (quantitativos) e em categorias de aptidão (qualitativos), permitindo ao usuário final obter informações das aptidões distribuídas nas regiões de análise (setores censitários).

Assim sendo, tomando como exemplo uma aplicação real para uma concessionária de energia elétrica, a presente ferramenta disponibilizará a empresa uma aplicação que utiliza dados públicos, abertos e gratuitos, ancorada em um software SIG também livre, aberto e gratuito. Outra vantagem diz respeito ao fácil manuseio da ferramenta por parte do operador.

Nesse contexto, a ferramenta torna-se útil para as concessionárias, segundo Melo (2019), para estudos de previsão de carga/planejamento de compra de energia, indicação de potenciais consumidores e instaladores, visando à abertura de novos mercados de comercialização de energia elétrica, além de subsidiar a avaliação por parte das concessionárias das mudanças técnicas decorrentes da instalação de sistemas fotovoltaicos em sua rede de distribuição.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos e apresentados neste Informe Técnico demonstraram que a metodologia é robusta quanto a sua aplicabilidade, principalmente devido ao fato de todas as etapas terem sido implementadas através de algoritmos executados dentro do ambiente SIG.

Os resultados alcançados provenientes do mapa de Aptidão Final através dos valores de pertinência demonstraram que a lógica *fuzzy* apresenta características que resultaram em um maior poder de heterogeneização dos dados de aptidão. Tal fato resulta das características inerentes à lógica *fuzzy*, que leva em consideração que todas as regiões apresentam algum nível de pertinência à aptidão, mesmo que esse nível seja baixo.

O estudo demonstrou também a importância da realização da análise espacial, uma vez que a partir dos clusters identificados, pôde-se implementar a lógica *fuzzy* funções e regras que permitiram incorporar a influência da inserção da tecnologia fotovoltaica no território, podendo esta atuar sobre a escolha dos consumidores quanto a instalação ou não dos sistemas fotovoltaicos.

A análise comparativa entre o resultado da Aptidão Final em categorias e o resultado obtido por Gastelu (2015) mostrou que ambas as metodologias classificaram a região central como "Alta", apontando uma convergência nesse sentido.

O estudo possibilitou demonstrar também que a lógica *fuzzy* permite obter os resultados tanto em valores numéricos *crisp* (através dos mapas de Aptidão Final), quanto em termos linguísticos qualitativos (apresentados pelos mapas de Aptidão Final em categorias), o que facilita a compreensão dos resultados por parte do público-alvo, por aproximar a leitura dos resultados à lógica do pensamento humano.

Finalmente, destaca-se que na literatura vigente não foi encontrado nenhum estudo com essas características, o que demonstra a contribuição para o setor elétrico brasileiro da metodologia proposta neste Informe Técnico.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517– Email: [diego.marcochi@ufabc.edu.br](mailto:diego.marcochi@ufabc.edu.br)

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

- (1) ANEEL. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>.
- (2) ASAKEREH, A.; SOLEYMANI, M.; SHEIKHDAVOODI, M. J. A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, v. 155, p. 342–353, 2017. ISSN 0038092X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.075>>.
- (3) CARDOSO DE LIMA, G. S. Avaliação de Locais com Potencial para a Implantação de Geração Distribuída sob a Perspectiva do Desenvolvimento Sustentável. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do ABC, Santo André, 2015.
- (4) CARDOSO DE LIMA, G. S. *et al.* Sustainable development enhanced in the decision process of electricity generation expansion planning. *Renewable Energy*, v. 123, p. 563–577, 2018.
- (5) CARVALHO, M. S. *et al.* *Cáp. 5 - Análise Espacial de Área*. Brasília: EMBRAPA, 2004. v. 0.44 p. ISBN 8573832606. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html>>.
- (6) EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 - ano base 2017. 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>>.
- (7) FGV. Financiamento para Energia Solar Fotovoltaica em Geração Distribuída. 2018. Disponível em: <<http://www.gvces.com.br/financiamento-para-energia-solar-fotovoltaica-emgeracao-distribuida?locale=pt-br>>.
- (8) FUCKS, S. D. *et al.* *Cáp. 1 - Análise Espacial e Geoprocessamento*. Brasília: EMBRAPA, 2004. 26 p. ISBN 8573832606. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html>>.
- (9) GASTELU, J. V. Análise Espacial do Potencial Fotovoltaico em Telhados de Residências Usando Modelagem Hierárquica Bayesiana. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita", Ilha Solteira, 2015.
- (10) GASTELU, J. V.; TRUJILLO, J. D. M.; PADILHA-FELTRIN, A. Hierarchical Bayesian Model for Estimating Spatial-Temporal Photovoltaic Potential in Residential Areas. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 9, n. 2, pp. 971–979, 2018.
- (11) GREENER. Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico GD Brasil - 1º Trimestre de 2019. 2019. Disponível em: <<https://greener.greener.com.br/1-trim-2019-gd>>.
- (12) IBGE. Geoftp IBGE. 2018a. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/organizacao\\_do\\_territorio/malhas\\_territoriais/malhas\\_de\\_setores\\_censitarios\\_divisoes\\_intramunicipais/censo\\_2010/setores\\_censitarios\\_shp/sp/sp\\_setores\\_censitarios.zip](ftp://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios_divisoes_intramunicipais/censo_2010/setores_censitarios_shp/sp/sp_setores_censitarios.zip)>.
- (13) IBGE. FTP IBGE. 2018b. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo\\_Demografico\\_2010/Resultados\\_do\\_Universo/Agregados\\_por\\_Setores\\_Censitarios/SP\\_Exceto\\_a\\_Capital\\_20190207.zip](ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/Agregados_por_Setores_Censitarios/SP_Exceto_a_Capital_20190207.zip)>.
- (14) LIMA, C. Análise multicritério e aplicação SIG para localização do potencial eólico, visando o desenvolvimento sustentável. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Santo André, 2017.
- (15) LOPES, E. C. Fuzzy AHP no Suporte a Decisão para Implantação de Geradores Eólicos sob a Ótica do Desenvolvimento Sustentável. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Santo André, 2019.

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517– Email: [diego.marcochi@ufabc.edu.br](mailto:diego.marcochi@ufabc.edu.br)

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.

(16) MAINZER, K. *et al.* Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and image recognition techniques. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, v. 155, p. 561–573, 2017. ISSN 0038092X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.065>>.

(17) MELO, D. M. Estimção Espaço-Temporal da Aptidão para Instalação de Sistemas Fotovoltaicos em Telhados Residenciais Utilizando Lógica Fuzzy. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Santo André, 2019.

(18) QGIS. Download QGIS. 2018. Disponível em: <<https://qgis.org/en/site/forusers/download.html>>.

#### 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Diego Marcochi de Melo**

Graduação (2010) em Gestão Ambiental: Escola de Artes, Ciências e Humanidades, EACH/USP. Especialização em Geoprocessamento: Centro Universitário SENAC/SP. Atualmente é Mestrando em Energia pela Universidade Federal do ABC, UFABC.



**Joel David Melo Trujillo**

Possui graduação em Engenharia Elétrica - Universidad Nacional Mayor de San Marcos (2006), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2010) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2014).



**Patrícia Teixeira Leite Asano**

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso (1995), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1999) e doutorado em Engenharia Elétrica São Carlos pela Universidade de São Paulo (2003).

(\*) Endereço Autor Responsável, Avenida dos Estados n° 5001 – Laboratório L508-1 - Bloco A – CEP 09210-580 Santo André, SP – Brasil

Tel: (+55 11) 98703-0517– Email: [diego.marcochi@ufabc.edu.br](mailto:diego.marcochi@ufabc.edu.br)

Os autores agradecem a INCT-INERGE e ao CNPq (Projeto Universal n. 422044/2018-0) e à FAPESP (projeto 2017/22577-9, 2019/00466-6) pelo auxílio financeiro.