

ALTERNATIVAS LOCACIONAIS PARA A GERAÇÃO RENOVÁVEL EM MINAS GERAIS: UMA DISCUSSÃO BASEADA NA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO ESPACIAL

Livia Maria Leite da Silva – liviamariasilva@hotmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Wilson Pereira Barbosa Filho – wilson.filho@meioambiente.mg.gov.br

Wemerson Rocha Ferreira – wemerson.ferreira@meioambiente.mg.gov.br

Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

Ilyia Kokshenev – illya@asotech.com.br

Roberta Oliveira Parreiras – rop@asotech.com.br

Advanced System Optimization Technologies (ASOTECH)

Petr Yacovlevitch Ekel – ekel@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Resumo. *Este trabalho aplica conceitos da Análise Multicritério Espacial para a prospecção de alternativas locais para a instalação de empreendimentos de geração baseados em energias renováveis - representadas pelas fontes solar, eólica e biomassa - no Estado de Minas Gerais. Para apoiar a realização do estudo prospectivo, foi elaborada e aplicada uma metodologia de análise multicritério específica. Foram reunidos os critérios relevantes para a análise, os quais foram modelados como geocampos, com base em dados de fontes oficiais. Tais geocampos foram processados como conjuntos fuzzy concebidos de forma a refletir os objetivos da prospecção. Os resultados obtidos mostram que as áreas mais aptas para a geração renovável encontram-se, principalmente, nos Territórios de Desenvolvimento do Triângulo Mineiro, Norte e Central do Estado. Verifica-se ainda que Minas Gerais é um Estado com um considerável potencial para a geração renovável que, contudo, é subutilizado. Ao mesmo tempo, por meio de tal estudo, é demonstrado o potencial de aplicação da análise multicritério espacial para apoiar estudos prospectivos que precedem os complexos processos de tomada de decisão acerca de investimentos em geração, seja no ambiente governamental ou na iniciativa privada.*

Palavras-chave: Energia solar, Energia eólica, Biomassa.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil vive o aumento da demanda por energia elétrica em vários setores da sociedade. É notório que a geração de eletricidade nacional é fortemente apoiada em hidroeletricidade, e, devido ao cenário de alteração do clima e escassez de chuvas, o mercado consumidor vem sendo atendido por meio do despacho das usinas térmicas, mais caras e danosas ambientalmente (Barbosa F., Azevedo, Xavier, 2013). A utilização da hidroeletricidade não somente garantiu o atendimento da maior parte do consumo nacional no horizonte dos últimos 50 anos, visto que as maiores hidroelétricas possuem cerca de 30 a 40 anos de instalação, como também situou a matriz energética do país entre as mais limpas do mundo (Barbosa F.; Azevedo; Andrade; 2014). Contudo, o contexto atual evidencia que, quanto menos diversificada é uma matriz, mais esta se encontra sujeita a fragilidades, sejam políticas – relacionadas ao interesse de grandes investidores - ou naturais. Desta forma, é de extrema importância agregar novas fontes a matriz energética, visando um suprimento mais seguro e econômico. Neste sentido, o Brasil conta com um alto potencial energético renovável, notadamente das fontes eólica, solar e biomassa. Contudo, a participação destas fontes no montante de energia gerada é ainda pequeno, tendo em vista a sua grande disponibilidade. Esforços no sentido de aumentar esta participação vêm sendo verificados, como a criação de mecanismos legais que promovem a utilização das fontes renováveis. De acordo com dados da EPE (2015) e do MMA (2015), entre os destaques do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2024, está o aumento da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil, da ordem de 73 mil MW (megawatts). Cerca de metade desta expansão será baseada nas fontes renováveis: eólica, solar, biomassa e PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas). São, portanto, bastante claras, não somente a necessidade do investimento na geração renovável, mas as oportunidades que o cenário atual tem traçado. Neste sentido, é importante que os Estados da Federação estejam bastante atentos, para que possam promover o aumento de sua participação na oferta da energia do sistema interligado nacional, visando não somente a garantia de seu próprio suprimento, mas inúmeros ganhos em termos econômicos, sociais e ambientais.

No Estado de Minas Gerais, que é objeto do estudo de caso aqui apresentado, de acordo com dados da ANEEL (2015), existem em operação, 270 usinas baseadas na fonte hidráulica - 137 Centrais de Geração Hidrelétrica (CGHs), 91 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), 42 Usinas Hidrelétricas (UHEs) - 2 baseadas na fonte solar fotovoltaica, 1 usina baseada na fonte eólica e 410 usinas termoeletricas. Destas últimas, apenas cerca de 15% utilizam a biomassa como fonte de calor, todo o restante, utiliza as fontes fósseis para este fim. Logo, a participação da energia renovável na matriz elétrica mineira é praticamente irrisória, o que caracteriza um contrassenso, tanto dentro do atual contexto descrito, quanto do ponto de vista da disponibilidade de recursos renováveis que goza este estado.

Tendo em vista a complexidade do cenário de geração, torna-se relevante o uso de ferramentas para apoiar a tomada de decisão acerca dos investimentos em geração, bem como as análises que permeiam a elaboração de programas e políticas públicas para o setor energético. Neste sentido, insere-se a Análise Multicritério Espacial (AMC-E), uma ferramenta que permite discriminar áreas com aptidão para determinada finalidade, levando em conta aspectos de natureza diversa na avaliação das alternativas locais. Ao longo do texto, será descrita a metodologia de AMC-E que foi desenvolvida e aplicada para apoiar o estudo de alternativas locais para a geração renovável no Estado mineiro. O estudo realizado revela a existência de localidades em Minas com configuração favorável à instalação de empreendimentos de geração renovável. Ao mesmo tempo, mostra maneiras como a metodologia proposta pode apoiar os estudos prospectivos que subsidiam decisões governamentais ou mesmo da iniciativa privada.

2. ANÁLISE MULTICRITÉRIO OU TOMADA DE DECISÃO ESPACIAL

A análise multicritério abrange um conjunto de modelos e métodos que auxiliam pessoas responsáveis pela tomada de decisão (decisores) na estruturação e resolução de problemas que envolvem a avaliação, classificação, priorização e escolha de soluções alternativas, conforme múltiplos critérios (Pedrycz; Ekel; Parreiras, 2011). Ela tem sido utilizada em conjunto aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) durante duas décadas para analisar problemas espaciais. Tais problemas em geral envolvem um grande conjunto de soluções alternativas e múltiplos critérios para sua avaliação. As soluções, frequentemente, são avaliadas por um ou mais especialistas com base em seu conhecimento relacionado ao assunto e preferências individuais (Greene et al., 2011).

A AMC-E exige a proposição de mecanismos cabíveis para a modelagem computacional da informação geográfica, que pode ser gerada mediante diferentes níveis de abstração (Borges; Davis; Laender, 2001). No nível conceitual e no nível de representação, é possível considerar a existência de duas classes de modelos de informações geográficas (Goodchild, 1992). Primeiramente, a classe de modelos de geocampos, em que o espaço geográfico é compreendido como uma superfície contínua, sobre a qual variam os fenômenos a serem observados segundo diferentes distribuições, e também a classe de modelos de geo-objetos, segundo a qual o espaço geográfico é representado como uma coleção de entidades distintas, discretas e identificáveis. Cada classe de modelo permite representar a realidade de forma distinta, e suporta tipos de operações próprias. Os dados considerados relevantes para a análise multicritério espacial podem estar estruturados na forma de geocampos e de geo-objetos. Os critérios de decisão são modelados como geocampos, os quais refletem os julgamentos do decisor. Estes podem ser construídos a partir de operações de transformação aplicadas diretamente a geocampos de dados ou a partir de operações aplicadas a geo-objetos, as quais geram, a partir destes, os geocampos que refletem os julgamentos do decisor.

2.1 Tomada de decisão espacial em ambiente *fuzzy*

A lógica *fuzzy* permite tratar e manipular dados gerados com algum tipo de imprecisão, o que é particularmente importante para a modelagem das incertezas intrínsecas aos julgamentos na tomada de decisão. Os conjuntos *fuzzy* são caracterizados por uma função de pertinência que associa cada objeto de interesse a um valor de pertinência inserido em uma escala definida no intervalo unitário. Assim, dado um conjunto X , o grau com que um elemento $x \in X$ pertence a um conjunto *fuzzy* B é definido pela função de pertinência $f_B(x): X \rightarrow [0; 1]$. Esta representação possibilita a transição gradual entre a pertinência completa $f_B(x) = 1$ e a ausência completa de pertinência $f_B(x) = 0$ (Zadeh, 1965).

Na tomada de decisão espacial, a teoria *fuzzy* permite atribuir a cada localidade representada em um geocampo, um valor de pertinência entre 0 e 1 que reflete o grau de atendimento dessa localidade a um determinado critério ou objetivo. Na lógica convencional, os únicos valores possíveis de serem atribuídos são 0, no caso de não atendimento, e 1, no caso de atendimento. A lógica *fuzzy* flexibiliza a avaliação incluindo na análise as incertezas da avaliação por meio da escala contínua. Neste trabalho, os conjuntos *fuzzy* correspondem a geocampos, que atribuem a cada coordenada espacial um valor no intervalo de 0 a 1, definido de modo a refletir o nível em que os objetivos estão sendo satisfeitos, do ponto de vista do decisor. Tendo sido construídos os conjuntos *fuzzy* para cada critério $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$, é possível aplicar diferentes operações de agregação para combinar as avaliações das alternativas conforme os diferentes critérios e, deste modo, definir uma avaliação global para cada solução alternativa (Pedrycz; Ekel; Parreiras, 2011).

A metodologia de AMC-E aqui utilizada admite que sejam realizadas operações de agregação em contextos diferentes. Permite realizar avaliação multicritério da adequação de cada localidade para cada forma de geração, separadamente e, também, a adequação de cada localidade, tendo em vista as três formas de geração, simultaneamente.

Entre diferentes operadores de agregação comumente utilizados na análise multicritério em ambiente *fuzzy* (Pedrycz; Ekel; Parreiras, 2011), para agregação dos critérios de avaliação do potencial de cada localidade para

implantação de empreendimentos de geração solar, eólica ou biomassa, optou-se por aplicar a média aritmética ponderada:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(x), \quad (1)$$

onde os pesos devem satisfazer $0 < w_i < 1$ e $\sum_{i=1}^m w_i = 1$, sendo definidos pelo decisor, em conformidade com a importância subjetivamente atribuída à cada critério para a formação da avaliação global de cada alternativa. De tal modo, obtém-se um conjunto *fuzzy* (modelado como geocampo) que reflete o nível de adequação de cada localidade para implantação de empreendimento solar $f_S(x)$, eólico $f_E(x)$ e de biomassa $f_B(x)$, conforme abordagem compensatória, em que as vantagens podem compensar as desvantagens de cada localidade. Em um segundo momento, para avaliar a adequação de cada localidade para implantação de empreendimentos de geração solar, eólica e de biomassa, simultaneamente, é aplicada a operação:

$$f(x) = \min(f_S(x), f_E(x), f_B(x)) \quad (2)$$

que implementa, em ambiente *fuzzy*, o operador *AND* da lógica booleana, permitindo identificar as localidades que atendem os objetivos conforme a regra: $f_S(x)$ e $f_E(x)$ e $f_B(x)$. Esta segunda agregação permite apoiar, por exemplo, as análises que permeiam a elaboração de ações governamentais para promover o desenvolvimento regional com base em empreendimentos de geração, oferecendo certa flexibilidade para o empreendedor escolher oportunamente o modo de geração, dadas as alternativas de energia renovável.

2.2 Tomada de decisão espacial em ambiente fuzzy: Ponderação pelo Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

Para auxiliar a atribuição de pesos aos critérios, na aplicação da média aritmética ponderada, adota-se aqui um procedimento baseado no AHP (Saaty, 1987). A atribuição de pesos requer julgar os critérios com relação a suas respectivas capacidades de contribuir para o objetivo global da prospecção, que neste trabalho, é a identificação de locais adequados à instalação de empreendimentos de geração renovável. Uma forma de realizar tais julgamentos consiste em considerar apenas dois elementos por vez e determinar qual deles tem maior importância. Para isso, Saaty sugere usar a escala de razões, cuja interpretação é exibida em Tab. 1.

Tabela 1 - Escala de valores (Saaty, 1987)

Escala verbal	Escala numérica	Escala verbal	Escala numérica	Escala verbal	Escala numérica
Preferência igual	1	Forte	5	Absoluta	9
Moderada	3	Muito forte	7	Intermediários	2,4,6,8

Os julgamentos comparativos podem ser organizados em uma matriz A . Os elementos dessa matriz satisfazem a condição de reciprocidade multiplicativa $a_{ji} = 1/a_{ij}$ e sua diagonal principal é unitária. De posse da matriz A , é possível derivar os pesos, obtendo-se o auto-vetor principal de A $w'_i = 1, 2, \dots, m$, e normalizando-os conforme a expressão a seguir:

$$w_i = \frac{w'_i}{\sum_{j=1}^m w'_j}, j=1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Uma das principais características do AHP é que ele permite verificar se houveram contradições nos julgamentos. A medida de consistência dos julgamentos baseia-se no autovalor máximo λ_{max} da matriz A , a partir do qual se calcula o Índice de Consistência.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1}, \quad (4)$$

e a Razão de Consistência $RC = IC/IR$, sendo IR um índice randômico dependente do tamanho da amostra (neste caso, o número de critérios), conforme mostra Tab. 2 (Saaty, 1987). Como regra geral, se RC for menor do que 0.1, então há suficiente consistência. Caso contrário, recomenda-se rever os julgamentos.

Tabela 2 - Índices Randômicos (Saaty, 1987)

m	1-2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

3. METODOLOGIA

A metodologia de AMC-E prevê as etapas gerais representadas pela Fig. 1 e descritas a seguir:

3.1 Etapa 1: Definição de critérios e restrições

Com relação ao problema de tomada de decisão considerado neste trabalho, o conjunto solução $X' \subseteq X$ corresponde às localidades do território mineiro em que é viável implantar empreendimentos de geração de energia renovável. Assim, o termo "viável" pressupõe a definição de restrições que excluem do domínio X , as localidades que não atendem a certos requisitos. Por sua vez, a aptidão das regiões viáveis com relação à recepção dos empreendimentos de geração é refletida pelos diferentes critérios de decisão modelados como conjuntos *fuzzy*. Nesta etapa, foram identificados os critérios relevantes para a escolha dos locais mais atrativos bem como das restrições sob o uso do solo que devem ser observadas, conforme mostra a Tab. 3. Após revisão bibliográfica (Janke, 2010; Haaren, Fthenakis, 2011; Aydin, Kentel, Duzgun, 2013; Charabi, Gastli, 2011; CEMIG, 2012), foram identificados os critérios relevantes para a prospecção aqui analisada, os quais foram aplicados ao estudo de caso e podem ser considerados em outros estudos similares.

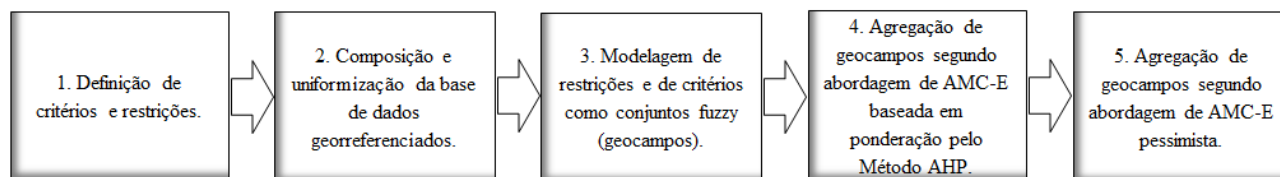


Figura 1- Etapas gerais da metodologia utilizada.

Tabela 3 - Critérios considerados na análise

Tipo de critério	Nome do critério	Classificação	Fonte dos dados
Técnico-econômico	Potencial energético (solar, eólico, biomassa)	Objetivo	SWERA, CENBIO
	Proximidade de vias de acesso (acessibilidade)	Objetivo	ANEEL
	Proximidade de linhas de transmissão (LTs) (conexão)	Objetivo	PNLT
	Distância de aeroportos	Objetivo	ANEEL
	Declividade	Objetivo	EMBRAPA
	Proximidade de corpos hídricos (hidrografia)	Objetivo	ANA
Socioambientais	Presença e distância de Unidades de Conservação (UCs)s	Restrição	ANEEL
	Presença e distância de quilombos	Restrição	ANEEL
	Presença e distância de terras indígenas	Restrição	ANEEL
	Distância de centros urbanos	Objetivo	IBGE
	Assentamentos do INCRA	Restrição	ANEEL

3.2 Etapa 2: Composição e uniformização da base de dados georreferenciados

A base de dados georreferenciados deve reunir as informações relacionados aos critérios de decisão, modeladas computacionalmente. Tais dados podem ser obtidos no formato de geocampos ou de geo-objetos, e devem ser convertidos para o mesmo sistema de coordenadas ou projeção, formato e resolução.

A modelagem de todos os critérios baseou-se em fontes de dados oficiais. Em particular, o critério relacionado ao potencial de biomassa foi construído com base no procedimento descrito abaixo. Todos os dados utilizados foram convertidos para o sistema de projeção *Continental Cônica Conforme de Lambert* especial para a América do Sul. A resolução das imagens geradas foi determinada mediante procedimento enunciado por Tobler (1989) e foi de células de 500m x 500m.

Composição da base de dados do potencial energético da biomassa: Neste trabalho, o termo biomassa é empregado para designar resíduos de culturas agrícolas diversas, passíveis de aproveitamento energético por meio do processo de queima direta. Para o cálculo do potencial energético desta fonte são utilizadas as informações disponíveis no Atlas Brasileiro de Bioenergia (CENBIO, 2012), onde é apresentada a produção anual municipal de resíduos agrícolas provenientes das culturas de arroz, amendoim, coco, cana de açúcar e silvicultura. De posse das quantidades de resíduos gerados - em toneladas - suas conversões energéticas são realizadas considerando-se o poder calorífico inferior PCI (kJ/kg) de cada tipo de insumo, uma eficiência de conversão e as horas de operação do sistema. Desta forma, dada uma quantidade MB gasta anualmente de insumo, expressa em kg, uma eficiência de conversão η , expressa em valor percentual, e as horas OP de operação do sistema, o potencial energético é calculado considerando-se um sistema que opera 8000 horas anuais, e uma eficiência de conversão de 25% (CENBIO, 2012), conforme segue:

$$Potencial (kWh) = \frac{PCI \cdot MB \cdot \eta}{3600} \cdot OP \quad (5)$$

Tabela 4 - PCI dos insumos analisados (Cenbio, 2012)

Biomassa	kJ/kg	Biomassa	kJ/kg	Biomassa	kJ/kg
Casca de arroz	14.145,50	Madeira	8.360,00	Casca de amendoim	17.898,01
Casca de coco	19.047,51	Bagaço de cana	13.376,00	-	-

3.3 Etapa 3: Modelagem de restrições e de critérios como conjuntos fuzzy (geocampos)

É uma prerrogativa do decisor a escolha do formato da função de pertinência que realiza a normalização, ou seja, que atribui a cada localidade um valor no intervalo entre 0 a 1. No estudo de caso aqui apresentado, para os critérios modelados a partir de operações de transformação aplicadas diretamente a geocampos de dados, estão sendo utilizadas funções de pertinência lineares por partes, conforme descrito a seguir:

Potencial energético Solar: a função de pertinência f_s é linearmente crescente, sendo nula nas localidades em que o potencial é mínimo, até atingir a pertinência igual a 1, onde o potencial atinge seu valor máximo.

Potencial energético Eólico: a função de pertinência f_e é linearmente crescente, sendo nula nas localidades em que a velocidade de ventos é mínima, até atingir a pertinência igual a 1, onde a velocidade atinge o seu valor máximo.

Potencial energético Biomassa: a função de pertinência f_b é linearmente crescente a partir do valor de potencial igual a 8MW/ano e igual a 1 a partir do valor de potencial igual a 10 MW/ano.

Declividade: a função de pertinência f_d atinge seu valor máximo em áreas com declividade até 3%. No intervalo entre 3 e 10% a pertinência decresce linearmente até 0 (CEMIG, 2012).

Para os critérios baseados em geocampos construídos a partir de operações aplicadas a geo-objetos, foi criado um geocampo de distâncias em relação aos conjuntos de geo-objetos pertinentes a cada critério e foram consideradas funções de pertinência lineares por partes, conforme descrito a seguir:

Proximidade de vias de acesso (acessibilidade): dado o geocampo de distância das estradas até os limites do Estado, a função de pertinência f_3 é máxima quando a distância é nula e diminui linearmente com o aumento da distância das estradas.

Proximidade de LTs (conexão): dado o geocampo de distância de LTs, a função de pertinência f_4 assume seu valor máximo quando a distância é nula e diminui com o aumento da distância das LTs.

Distância de aeroportos: dado o geocampo de distância de aeroportos, a função de pertinência f_5 é nula nos locais onde a distância é nula e cresce linearmente atingindo o valor máximo a partir de um raio de 3 km dos aeroportos;

Proximidade de corpos hídricos: dado o geocampo de corpos hídricos, a função de pertinência f_6 é decrescente com o aumento da distância de corpos hídricos.

Distância de centros urbanos: a função de pertinência f_7 , nas às áreas ocupadas pelos centros urbanos, assume valor igual a zero e, nas demais áreas, valor igual a 1.

Para a modelagem de restrições associadas aos requisitos necessários para que uma localidade seja considerada viável, é gerado um geocampo em que, às áreas impeditivas, é atribuído o valor 0 e, às demais áreas, é atribuído o valor 1. Após a agregação dos critérios do tipo objetivo, as restrições são aplicadas de modo a excluir tais áreas do conjunto X , permitindo identificar o conjunto solução $X' \subseteq X$.

Presença de Assentamentos do INCRA: Os assentamentos do INCRA foram tratados como uma restrição. Às áreas que caracterizam a restrição sobre o uso do solo, a função de pertinência f_8 atribui o valor 0, e às demais áreas atribui o valor 1.

Presença e distância de UCs, quilombos, terras indígenas (Áreas Especiais): As questões relacionadas com as áreas especiais são modeladas como uma restrição, que exclui as correspondentes localidades do conjunto X e, para as localidades remanescentes em X' , considera-se que no entorno destas áreas, a função de pertinência f_9 é linearmente decrescente até um raio de 3 km das mesmas, a partir do qual f_9 é igual a 1.

3.4 Etapa 4: Agregação de geocampos segundo abordagem baseada em ponderação pelo método AHP

Nesta etapa, a Eq. (1) é aplicada separadamente para cada fonte, com a escolha dos pesos dos critérios, por meio do Método AHP (AMC-E/AHP), gerando, como resultado: $f_s(x) = w_1 f_s(x) + w_2 f_2(x) + \dots + w_9 f_9(x)$, $f_e(x) = w_1 f_e(x) + w_2 f_2(x) + \dots + w_9 f_9(x)$ e $f_b(x) = w_1 f_b(x) + w_2 f_2(x) + \dots + w_9 f_9(x)$. No estudo aqui apresentado, os pesos foram obtidos por meio do processamento da matriz A (Tab. 5) e aplicados aos casos das três fontes analisadas (embora não exista impedimento para que diferentes pesos sejam considerados para a AMC-E de cada fonte). A relação de consistência encontrada foi de 0,033, valor menor que 0,1, o que classifica a avaliação como consistente. Foi obtido o seguinte vetor de pesos:

$$[w_1 = 0,2746; w_2 = 0,2081; w_3 = 0,2081; w_4 = 0,0980; w_5 = 0,0980; w_6 = 0,0441; w_7 = 0,0441; w_8 = 0,0251],$$

a partir do qual é possível extrair a seguinte ordem de importância dos critérios: potencial energético; acessibilidade empatado com conectividade ao sistema; declividade empatado com proximidade de corpos hídricos; distância de centros urbanos empatado com distância de áreas especiais, e distância de aeroportos.

Tabela 5 - Matriz de avaliações (A)

	Pot	Aces	Conec.	Decliv.	Hidro	Centros urb.	Áreas esp.	Aero
Pot	1	2	2	3	3	5	5	6
Aces	$1/2$	1	1	3	3	5	5	6
Conec.	$1/2$	1	1	3	3	5	5	6
Decliv.	$1/3$	$1/3$	$1/3$	1	1	3	3	5
Hidro	$1/3$	$1/3$	$1/3$	1	1	3	3	5
Centros Urb.	$1/5$	$1/5$	$1/5$	$1/3$	$1/3$	1	1	3
Áreas Esp.	$1/5$	$1/5$	$1/5$	$1/3$	$1/3$	1	1	3
Aero	$1/6$	$1/6$	$1/6$	$1/5$	$1/5$	$1/3$	$1/3$	1

3.5 Etapa 5: Agregação de geocampos segundo abordagem de análise multicritério pessimista

Nesta etapa, realiza-se a agregação entre os geocampos $f_S(x)$, $f_E(x)$ e $f_B(x)$, aplicando-se a Eq. (2), que atribui a cada localidade o menor valor de pertinência entre $f_S(x)$, $f_E(x)$ ou $f_B(x)$. Penalizando mais as localidades que apresentam as maiores fragilidades, esta abordagem faz com que se sobressaiam (sejam melhor avaliadas) as localidades em que for mais aceitável investir em qualquer uma das três fontes de energia consideradas.

4. ESTUDO DE CASO: RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 2 apresenta os territórios de Desenvolvimento Mineiros (Dir.), que auxiliam a discussão dos resultados. Também é apresentado o mapa de Potencialidade Social de Minas (Esq.), pertencente ao Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE) (Scolforo, 2010), com o intuito de chamar a atenção para a possibilidade de uma região ser favorecida socioeconomicamente pela instalação de um empreendimento de geração renovável.

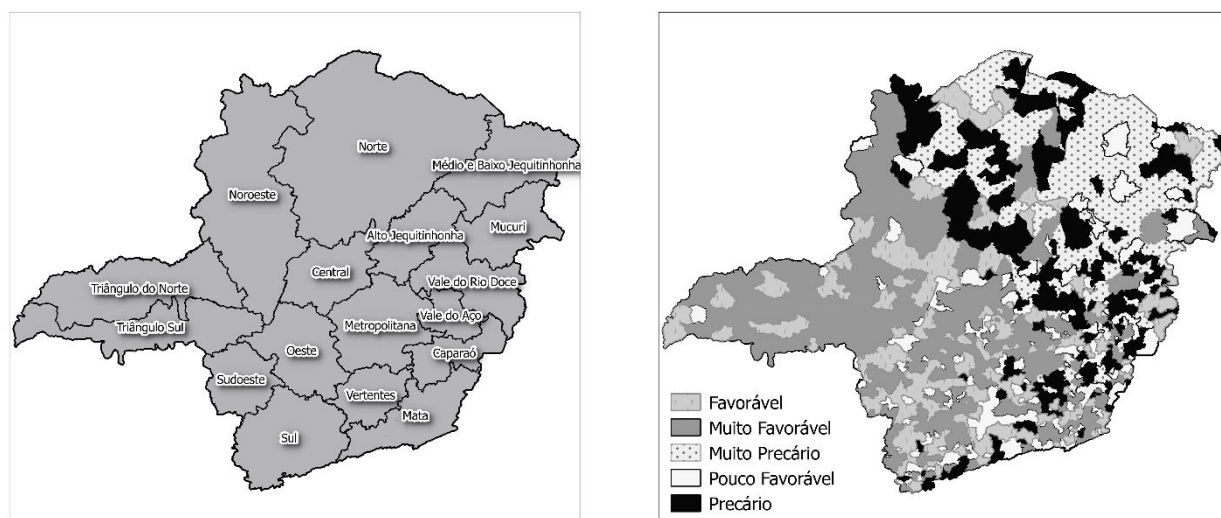


Figura 2 - Territórios de Desenvolvimento (Agência Minas, 2015) e Potencialidade Social (Scolforo, 2010)

A aplicação da metodologia gerou os geocampos $f_S(x)$, $f_E(x)$, $f_B(x)$ e $f_{min}(x)$, os quais estão representados na Fig. 3, com aplicação das restrições, conforme descrição apresentada na Etapa 3 da metodologia. Analisando-se essa figura, observa-se que, no caso da fonte eólica (Sup. Dir.), há a ocorrência de regiões promissoras nos Territórios do Triângulo Norte, Triângulo Sul, Norte e, de forma menos significativa, nos territórios Central, Metropolitana e Caparaó. No caso da fonte solar (Sup. Esq.), as regiões com maior aptidão aparecem, novamente, nos territórios do Triângulo Norte e Sul, Norte, Central e, também, na região Noroeste. No caso da biomassa (Inf. Dir.), nos termos aqui tratados, regiões promissoras estão mais pulverizadas pelo Estado, ocorrendo em praticamente todos os Territórios de Desenvolvimento. Destacam-se, novamente as regiões pertencentes ao Triângulo Mineiro, Norte, Noroeste e, neste caso, também os territórios do Alto, Médio e Baixo Jequitinhonha, Caparaó, Vale do Rio Doce e Vale do Aço. Considerando-se o geocampo $f_{min}(x)$, (Inf. Esq.), concentram-se, nas regiões do Triângulo Mineiro, Norte, Noroeste e Central, as áreas com maior aptidão para receber plantas de geração, tendo em vista as três fontes de forma simultânea.

A observação da Fig. 2 e do geocampo $fmin(x)$, na Fig. 3, permite avaliar que muitas regiões com alta aptidão são classificadas pelo ZEE (Scolforo, 2010), como regiões de baixa potencialidade social. Tais regiões estão apontadas na Fig. 3 pelas setas pretas. Neste tipo de localidade, a implantação da geração renovável seria motivada também por este aspecto, uma vez que, empreendimentos dessa natureza caracterizam um vetor de desenvolvimento social, devido à geração de emprego e renda. O Estado seria beneficiado, portanto, em termos energéticos, ambientais e econômico-sociais. As dificuldades inerentes à inserção da geração renovável em Minas possuem natureza diversa, e estão relacionadas a aspectos políticos, econômicos e culturais. Pode-se citar a complexidade dos processos de licenciamento ambiental que envolve as fontes renováveis, que são praticamente iguais aos processos de licenciamento para as fontes de origem fóssil. Portanto, uma oportunidade de impulsionar a geração renovável em Minas seria a simplificação dos processos de licenciamento ambiental, e a criação de legislações específicas para cada fonte desta natureza. As fontes renováveis não devem ser isentas do compromisso e licenciamento ambiental, porém devem ter suas particularidades valorizadas na concepção destes processos. Outro dificultador é que, muitas vezes, os lugares com maior disponibilidade de recursos energéticos renováveis encontram-se em áreas que caracterizam patrimônios naturais e/ou históricos (Aydin, Kentel, Duzgun, 2013), ou com características de relevo e vegetação que prejudicam a implantação dos empreendimentos, o que aumenta a dificuldade dos processos de licenciamento e instalação. Este último aspecto, em especial, também reforça a potencialidade da ferramenta apresentada.

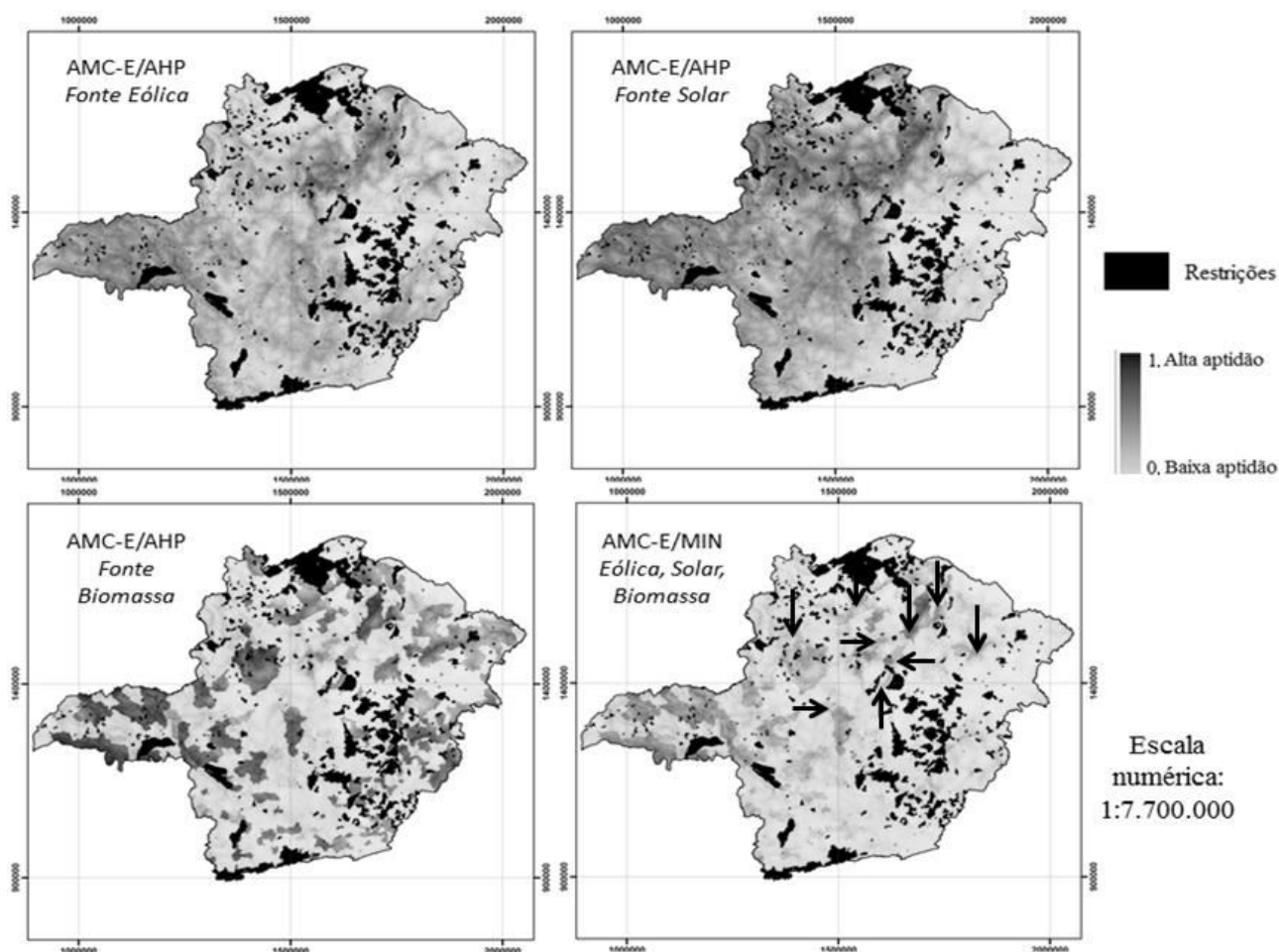


Figura 3 - Resultados

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo baseado em uma metodologia de AMC-E elaborada para facilitar a prospecção das localidades de Minas Gerais para a instalação de empreendimentos de geração renovável. No estudo realizado, a metodologia permitiu identificar com certa agilidade localidades que aparentam ser aptas à instalação de empreendimentos baseados em cada fonte analisada (de forma independente e, também, de forma conjunta). Contudo, é importante ressaltar que o modelo de AMC-E construído reflete os julgamentos dos especialistas envolvidos em sua elaboração. Mediante outros ajustes do modelo, como por exemplo, a escolha de diferentes funções de pertinência ou de outras operações de agregação, resultados diferentes podem ser obtidos. Além disso, em estágios mais avançados da prospecção, questões políticas, jurídicas ou mesmo ambientais (por exemplo, presença de espécies em extinção), podem eventualmente surgir e constituir fatores restritivos para localidades aqui consideradas aptas. Porém, mesmo com tais limitações da metodologia, os resultados aqui apresentados podem servir como um norteador para discussões iniciais, chamando atenção para certas configurações potencialmente favoráveis em Minas Gerais. Sem o uso da metodologia,

seria difícil identificar tais condições. O estudo revelou o considerável potencial de certas localidades para a instalação de empreendimentos de geração renovável que se encontra, contudo, subutilizado. Este fato pode representar para o Estado e, talvez, também para o país, uma perda em termos ambientais, sociais e relacionados à segurança do suprimento energético. A geração renovável é um mecanismo que promove não somente um suprimento mais econômico e sustentável, mas também oferece ganhos em termos sociais, devido à geração de emprego e renda, o que é particularmente importante no caso de Minas Gerais, onde se constatou que as regiões de maior fragilidade social possuem bons resultados em termos de aptidão para a geração renovável. O momento atual é, portanto, oportuno para o Estado investigar fragilidades que travam a implantação da geração renovável e propor novos mecanismos legais que possibilitem o aproveitamento dos recursos amplamente disponíveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq que apoiou este trabalho por meio das bolsas 305036/2011-4 e 311473/2014-8.

REFERÊNCIAS

- Agência Minas. 2015. Fóruns Regionais de Governo. Disponível em <<http://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticias/governador-pimentel-anuncia-a-criacao-dos-foruns-regionais-de-governo/>>. Acesso 09 jun 2015.
- Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015. Banco de Informações de Geração. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 27 junho 2015.
- Aydin, N. Y.; Kentel, E.; Duzgun, H.S., 2013. GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey, *Energy Conversion and Management*, vol. 70, pp.90–106.
- Barbosa F., W. P., Azevedo, A. C. S., Andrade, L. S. V. 2014. O uso da análise hierárquica como auxílio na tomada de decisão de políticas públicas em energia eólica considerando aspectos de sustentabilidade, V CBENS - V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife.
- Barbosa F., W. P.; Azevedo, A. C. S.; Xavier, M. V. E. 2013. Study of complementarity between wind and hydropower schemes for the state of Minas Gerais, I Latin Hydro Power & Systems Meeting, Campinas.
- Borges, K. A. V.; Davis, C. A.; Laender, A. H. F. 2001. OMT-G: An object-oriented data model for geographic applications. *Geoinformatica*, vol. 5(3), pp. 221–260.
- Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO). 2012. Atlas da Biomassa das regiões brasileiras. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/atlasbiomassa/residuosagricolas.htm>>. Acesso 10 maio 2013.
- Charabi, Y.; Gastli, A. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. 2011. *Renewable Energy*, vol. 36, p. 2554–2561.
- Companhia Energética de Minas Gerais. CEMIG. 2012. Atlas solarimétricos de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/pt-br>>. Acesso 12 nov 2014.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME). 2015. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/PDEE/PDE%202024.pdf>>. Acesso 01 out. 2015.
- Greene, R. et al. 2011. GIS-based multiple-criteria decision analysis. *Geography Compass*, vol. 10, pp. 412–432.
- Goodchild, M. F. 1992. Geographical data modeling. *Computers & Geosciences*, vol. 18(4), pp. 401 – 408.
- Haaren, R. V.; Fthenakis, V. GIS-based wind farm site selection using spatial multicriteria analysis (SMCA) (2011). Evaluating the case for New York State. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, p. 3332–3340.
- Janke, J. R. Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. 2010. *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2228 – 2234.
- Pedrycz, W.; Ekel, P.; Parreiras, R. 2011. Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods, and Applications. [S.l.]: New York/Chichester/Brisbane: John Wiley & Sons.
- Saaty, R. W. 1987. The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. *Math Modelling*, vol. 9, pp. 161–176.
- Scolforo, J. R. S. O. A. D. d. C. L. M. T. d., 2008. Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais (ZEE). Lavras: UFLA. Disponível em <<http://www.zee.mg.gov.br/>>. Acesso 05 abril 2015.
- Tobler, W. 1989. Resolution, resampling, and all that. University of California. Disponível em: <[http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/publications/pdf/docs/geog analysis-/ResltnEtc.pdf](http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/publications/pdf/docs/geog%20analysis%20-%20ResltnEtc.pdf)>. Acesso 13 julho 2015.
- Zadeh, L. A. *Fuzzy sets*. 1965. *Information and Control*, vol. 1, pp. 338—353.

LOCATIONAL ALTERNATIVES FOR RENEWABLE GENERATION IN MINAS GERAIS STATE: A DISCUSSION BASED ON THE SPATIAL MULTICRITERIA ANALYSIS

Abstract. *This paper applies concepts of Spatial Multi-Criteria Analysis in the prospecting process for identifying adequate locations for the installation of renewable energy generation plants (solar, wind and biomass) in the state of Minas Gerais. In order to support the prospective study, a specific methodology for multicriteria analysis was elaborated and applied. The relevant criteria were identified and modeled as geo-fields, based on data from official sources. These geo-fields were processed as fuzzy sets designed to reflect the objectives of the prospection. The obtained results show that the most suitable areas for renewable generation are located mainly in Triângulo Mineiro, Norte and Central Development Territories. It also can be noted that Minas Gerais is a state with a significant potential for renewable generation, although it is still underused. This study also demonstrates the applicability of Spatial Multi-Criteria Analysis to support prospective studies that usually precede the complex decision-making processes associated with generation investments, whether in government or in the private sector.*

Key words: Solar Energy, Wind Energy, Biomass