



Planejamento do Traçado de Diretrizes de Linha de Transmissão de Energia Elétrica Baseado em Otimização Multicritério e SIG

Multicriterial-based Optimization and SIG for Planning of the Power Line Tracking

*Fabiano Peixoto Freiman*¹
*Daniel Rodrigues dos Santos*²

Recebido em fevereiro de 2019.
Aprovado em setembro de 2019.

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma análise da aplicação da modelagem espacial multicritério (MEM) para a definição do traçado automático de diretrizes de linhas de transmissão de energia elétrica (LTEE). A MEM é baseada na utilização de dados geográficos associados ao método de análise multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Para avaliar a eficiência da MEM foi realizado dois estudos de caso (localizados no estado do Paraná): LTEE que liga a Subestação (SE) de Sarandi à SE de Londrina e a LTEE que conecta a SE de Figueira à SE de Ponta Grossa Norte. Os resultados obtidos mostraram que o processo é aplicável na etapa de planejamento de novos traçados de LTEE, auxiliando os analistas na agregação dos diferentes critérios em um único problema de otimização, minimizando a complexidade da etapa de planejamento e auxiliando na atividade de tomada de decisão.

PALAVRAS-CHAVE: AHP. Otimização. Traçado de linhas de transmissão de energia elétrica. SIG.

ABSTRACT

In this paper, a multicriterial-based optimization and GIS approach for modeling of power line transmission tracking is proposed. The multicriterial modeling (MEM) is based on a joint enforce between geographic data and analytic hierarchy process (AHP). To evaluate the proposed method, we conducted experiments with real data using the substation power lines from Sarandi to Londrina and Figueira to Ponta Grossa Norte. The obtained results showed that MEM is applicable in the planning stage for new power lines tracking. It is able to aggregate different criterions into a single optimization problem, minimizing the complexity of the planning stage and assisting in the process of decision-making.

¹Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Brasil. E-mail: fabianofreiman@ufpr.br

²Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Brasil. E-mail: danielsantos@ufpr.br

KEYWORDS: AHP. Optimization. Power line transmission. GIS.

* * *

Introdução

O Brasil possui um sistema de transmissão de energia elétrica extenso e complexo que necessita de expansão em função do crescimento econômico e populacional. Para assegurar a existência de recursos energéticos e garantir futuras demandas, é necessária a construção de novas instalações de linhas de transmissão de energia elétrica (LTEE) e subestações em todas as regiões do país. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2018), o investimento previsto pelo Ministério de Minas e Energia (MME), entre os anos de 2018 a 2024, é em cerca de R\$ 33 bilhões. Todavia, esse procedimento (construções de novas LTEE) envolve fatores de cunho social, ambiental e econômico, tornando o processo de planejamento de traçado de diretrizes de LTEE um desafio.

A construção de uma LTEE causa impactos sobre o meio ambiente, devido a fatores como poluição eletromagnética, desmatamento, fragmentação de habitat, poluição visual e impactos em áreas urbanizadas. No processo de planejamento de definição de uma diretriz estes fatores devem ser equacionados e associados a fatores econômicos em um único problema de otimização. Em abordagens convencionais esse processo é realizado de forma manual, podendo gerar inconsistências.

A aplicação de Métodos de Análise Multicritério (MAMs) associados a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) fornece soluções que permitem compreender os fatores inerentes ao processo de definição de traçado de diretrizes de LTEE, auxiliando na identificação das variáveis e suas influências na obtenção de resultados fundamentados em modelos realistas. Segundo Pohekar e Ramachandran (2003), essa metodologia facilita o processo de tomada de decisão, tornando a solução explícita, racional e eficiente.

Neste contexto, para a minimização da complexidade do procedimento de definição de diretrizes de LTEE, neste trabalho é proposta a utilização da modelagem espacial multicriterial (MEM) associada ao SIG, proporcionando maior agilidade no processo de coleta, documentação e associação dos critérios relevantes na etapa de planejamento do empreendimento. Especificamente, o trabalho visa determinar os traçados de diretrizes de LTEE de forma automática e objetiva, com economia de tempo e de recursos humanos, diminuindo a necessidade de visitas a campo e possíveis retrabalhos.

1 Estado da arte

Shu et al (2012) propuseram um método para a definição automática de diretrizes de LTEE considerando variáveis ambientais. A proposta é baseada em Programação Linear (PL) associada ao SIG, objetivando a minimização de custos de construção. Monteiro et al (2005) utilizaram variáveis geográficas associadas a valores de construção para a definição de diretrizes de LTEE, no qual o traçado foi obtido com a aplicação de algoritmos baseado em Programação Dinâmica (PD). EPRI (2006) combinou a utilização de MAM associado ao SIG para a definição do caminho mínimo entre subestações. A abordagem foi realizada a partir da construção de três superfícies de custo (ambiental, social e econômica) combinadas a partir da aplicação de álgebra de mapas.

Lima et al. (2016) utilizou o algoritmo de Dijkstra (1959) para a determinação do traçado otimizado de diretrizes. A contribuição do trabalho foi o desenvolvimento de um método de ponderação baseado nos custos monetários (R\$/km) de construção. Thiam e Demarco (2016), utilizaram o Método de Análise Hierárquica (AHP, do inglês *Analytic Hierarchy Process*) associado à técnica *Delphi* (LISTONE e TUROFF, 2002) para validar a consistências dos pesos atribuídos aos critérios sociais, ambientais e econômicos.

Grassi et al (2014) e Li et al (2016), além dos critérios tradicionais inseridos normalmente nos processos de otimização do traçado de diretrizes de LTEE, propuseram a inserção de dados adicionais para aprimorar a metodologia e minimizar os custos. O primeiro inseriu dados relacionados à poluição visual causada pelo empreendimento, e o segundo inseriu restrições relacionadas aos riscos de descargas atmosféricas na região de implantação. Bagli et al. (2011) definiram o traçado otimizado de LTEE a partir da construção de uma superfície de custo com base na densidade populacional, custo de implementação e proximidade de construções. Além disso, os autores realizaram uma investigação de sensibilidade do modelo a mudanças nas posições dos pontos finais e iniciais dos traçados. Os três métodos empregaram o algoritmo de Dijkstra (1959) para a definição do traçado otimizado.

Shu et al (2012) propuseram um método para a definição automática de diretrizes de LTEE considerando variáveis ambientais. A proposta é baseada em Programação Linear (PL) associada ao SIG, objetivando a minimização de custos de construção. Monteiro et al (2005) utilizaram variáveis geográficas associadas a valores de construção para a definição de diretrizes de LTEE, no qual o traçado foi obtido com a aplicação de algoritmos baseado em Programação Dinâmica (PD). EPRI (2006) combinou a utilização de MAM associado ao SIG para a definição do caminho mínimo entre subestações. A abordagem foi realizada a partir da construção de três superfícies de custo (ambiental, social e econômica) combinadas a partir da aplicação de álgebra de mapas.

Lima et al. (2016) utilizou o algoritmo de Dijkstra (1959) para a determinação do traçado otimizado de diretrizes. A contribuição do trabalho foi o desenvolvimento de um método de ponderação baseado nos custos monetários (R\$/km) de construção. Thiam e Demarco (2016), utilizaram o Método de Análise Hierárquica (AHP, do inglês *Analytic Hierarchy Process*) associado à técnica *Delphi* (LISTONE e TUROFF, 2002) para validar a consistências dos pesos atribuídos aos critérios sociais, ambientais e econômicos.

Grassi et al (2014) e Li et al (2016), além dos critérios tradicionais inseridos normalmente nos processos de otimização do traçado de diretrizes de LTEE, propuseram a inserção de dados adicionais para aprimorar a metodologia e minimizar os custos. O primeiro inseriu dados relacionados à poluição visual causada pelo empreendimento, e o segundo inseriu restrições relacionadas aos riscos de descargas atmosféricas na região de implantação. Bagli et al. (2011) definiram o traçado otimizado de LTEE a partir da construção de uma superfície de custo com base na densidade populacional, custo de implementação e proximidade de construções. Além disso, os autores realizaram uma investigação de sensibilidade do modelo a mudanças nas posições dos pontos finais e iniciais dos traçados. Os três métodos empregaram o algoritmo de Dijkstra (1959) para a definição do traçado otimizado.

2 Materiais e Método

2.1 Materiais

Para a realização dos experimentos foi utilizado um Microcomputador desktop com processador Intel Core TM 2 Quad, 2Gb de Ram e 260 Gb de espaço em disco. Foram utilizados os softwares gratuitos e de código aberto QGIS 2.18.27 e GRASS 7.4.2, o sistema operacional Ubuntu OSGeoLive 12.0 e a biblioteca GDAL 2.0. Os dados utilizados neste trabalho são apresentados na Subseção 2.1.1.

2.1.1 Conjunto de dados

Os dados empregados neste trabalho compreendem 11 camadas, listadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Camadas

Grupo	Critérios	Escala	Formato	Fonte
Ambiental	Unidades de conservação	Não informado	Vetorial	IAP (2018)
	Remanescentes florestais	1:40000	Vetorial	IAP (2018)
	Áreas de proteção ambiental	1:40000	Vetorial	IAP (2018)
	Terras indígenas/Quilombolas	Não informado	Vetorial	INCRA (2018)
Social	Áreas urbanas e periurbanas	1:60000	Matricial	-
	Assentamentos	Não informado	Vetorial	INCRA (2018)
	Impacto visual da paisagem	1:60000	Matricial	-
	Fragmentação da agricultura	1:60000	Matricial	-
Econômico	Áreas alagadas	1:60000	Matricial	-
	Declividade	1:60000	Matricial	EMBRAPA (2018)
	Paralelismo com outros empreendimentos lineares	1:180000	Vetorial	EPE (2018b) e (DNIT, 2018)
	Mapa de velocidade de vento	1:180000	Matricial	-

Fonte: Elaborado pelos autores.

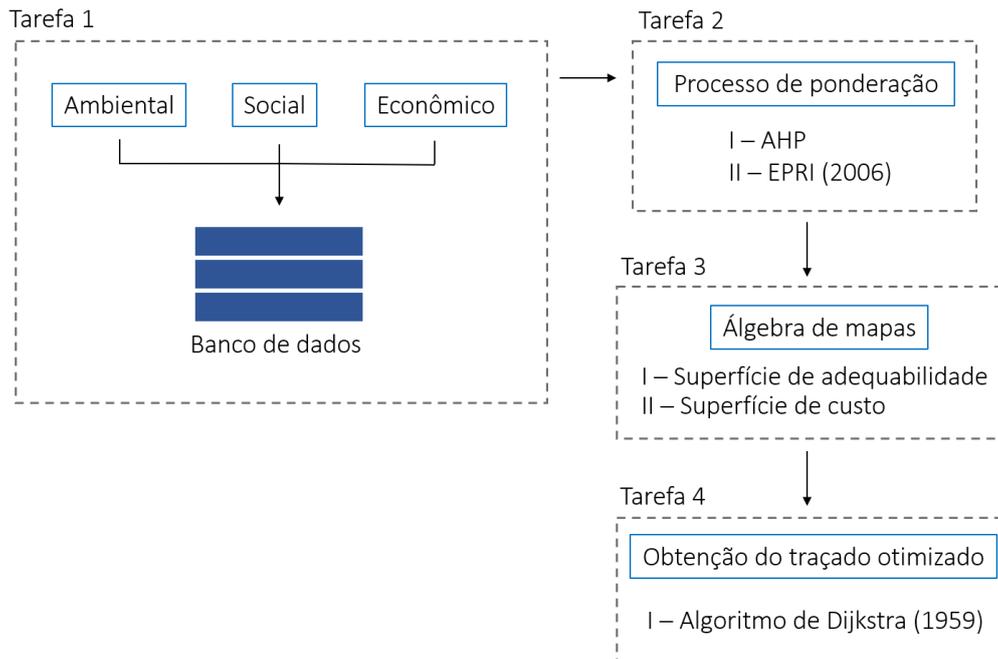
Todos os insumos utilizados neste trabalho (Quadro 1) foram adquiridos através de órgãos públicos e disponibilizados gratuitamente em plataformas *online*. Os critérios áreas urbanas e periurbanas, fragmentação da agricultura e áreas alagadas foram obtidas através da classificação supervisionada de imagens *Landsat 8* (ano de 2018), obtidas em INPE (2018). O critério de impacto visual da paisagem foi definido a partir da identificação de um *buffer* de 360 m de diâmetro ao redor das áreas urbanas, dividido em 4 subcritérios (de 90 m em 90 m). Os dados adquiridos em formato vetorial foram convertidos para o formato matricial para possibilitar a realização do processo de álgebra de mapas.

As escalas dos insumos utilizados foram compatibilizadas para a escala menos detalhada dentre os insumos utilizados (1:180000). Os critérios considerados foram divididos em três grupos: ambiental, econômico e social. Foi utilizado o Sistema de coordenadas projetado Universal Transversa de Mercator (UTM) no Fuso 22S e o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS, 2000).

2.2 Método

O método proposto está dividido em 4 tarefas, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama do método



Fonte: Elaborada pelos autores.

A Tarefa 1 consiste na definição dos critérios a serem otimizados no processo de definição do traçado de diretrizes de LTEE. Na Tarefa 2, o método AHP (SAATY, 1980) foi aplicado para definir o grau de importância de cada critério (listados no Quadro 1) na participação do processo de otimização. Os subcritérios utilizados (apresentados na Tabela 1) também foram ponderados a partir do processo proposto por EPRI (2006). O software QGIS 2.18.27 e o GRASS 7.4.2 foram utilizados para a realização da reclassificação dos dados de acordo com os pesos obtidos com a aplicação das escalas de ponderação, bem como a construção da superfície de custo acumulado a partir da aplicação de álgebra de mapas (Tarefa 3). Finalmente o algoritmo de Dijkstra (1959) é aplicado para a determinação da rota otimizada (Tarefa 4).

2.2.1 Modelagem espacial multicriterial

O modelo matemático de otimização considera um espaço de busca discreto sobre uma superfície de adequabilidade construída em formato matricial. Cada pixel desta superfície representa um valor de adequabilidade de um determinado local para receber o empreendimento em questão. A construção da superfície de adequabilidade foi realizada a partir da combinação de dados geográficos (apresentados no Quadro 1) ponderados a partir da aplicação de MAM, permitindo modelar o problema em relação a um conceito particular (minimização de impactos ambientais, sociais e econômicos).

Segundo Aissi et al. (2012) a aplicação do MAM associado a dados geográficos possibilita avaliar uma alternativa (θ) em relação a um critério g_i , sendo denotado por $g_i(\theta)$ e cada critério utilizado no processo de modelagem é representado por um conjunto de células (U_i), quantificadas a partir de uma escala (ε_i) de avaliação e associado a uma camada m_i ($m_i = \{s, g_i(s) : s \in U_i\}$), como apresentado na Equação 1.

$$g: \begin{matrix} U_i \rightarrow \varepsilon_i \\ s \rightarrow g_i(s) \end{matrix} \quad (1)$$

A combinação dos diferentes critérios em uma única superfície foi realizada a partir da aplicação do processo denominado de álgebra de mapas, que consiste na combinação célula-a-célula de distintas camadas de dados matriciais empilhadas a partir de uma função matemática (S) (Equação 2), como segue:

$$s = \sum_I^n w_i x_i \quad (2)$$

Em que w_i é o peso atribuído ao critério i e x_i o número normalizado para o mesmo critério e n o número de critérios utilizados. Os pesos (w) foram definidos em duas etapas. Primeiramente foi utilizada a escala de ponderação

proposta por EPRI (2006) para a ponderação dos subcritérios utilizados no processo de modelagem. Essa escala varia de 1 a 9. O valor 1 indica maior adequação e 9 áreas inadequadas para o recebimento do empreendimento e cada critério (camada) foi ponderado a partir da aplicação do método AHP (SAATY, 1980), como descrito na Subseção 2.2.2.

2.2.2 Método AHP

O método AHP foi utilizado para estabelecer um modelo de combinação de dados com base em comparações pareadas. Neste processo se aplica a escala fundamental de Saaty (1980) que varia de 1 a 9. O valor 1 indica importância igual, 3 moderadamente mais, 5 fortemente mais, 7 muito fortemente mais e 9 extremamente mais importante. Os valores 2, 4, 6 e 8 podem ser utilizados para uma classificação intermediária. A partir da aplicação desta escala é possível transformar dados qualitativos em dados quantitativos, construindo uma matriz de comparação (A), de dimensão $n \times n$ (em que n é o número de critérios a ser avaliados) como apresentada na Equação 3.

$$A = \begin{bmatrix} \text{critério} & b & c & d & \dots \\ b & 1 & a_{12} & a_{13} & a_{1n} \\ c & 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ d & \dots & \dots & \ddots & a_{3n} \\ \vdots & 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Cada componente da matriz A (a_{ij}) representa a importância do critério j em relação ao critério i . Caso $a_{ij} > 1$, então o critério j apresenta importância superior a i , caso contrário, i apresentará maior relevância no processo de otimização e então $a_{ij} < 1$. Se os critérios j e i apresentarem importâncias equivalentes, então $a_{ij} = 1$.

Para atribuir e interpretar os pesos relativos a cada critério, segundo Saaty (1980), é necessário normalizar a matriz A , fazendo-se igual a 1 a soma de cada coluna da matriz de comparação. Esse processo é realizado pela

divisão de cada elemento de A pelo somatório dos valores da coluna que pertença (Equação 4), como segue:

$$\alpha'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{l=1}^m a_{il}} \quad (4)$$

A contribuição do critério no processo de modelagem é definida a partir do cálculo do vetor w de prioridade (Equação 5) que representa os pesos relativos entre pares de critérios.

$$w = \sum_{l=1}^m \frac{\alpha'_{lj}}{m} \quad (5)$$

Uma das vantagens da aplicação do método AHP é a possibilidade de calcular o índice de consistência (IC) (Equação 6) em relação à decisão do analista.

$$IC = \frac{x - n}{n - 1} \quad (6)$$

Em que x é o somatório do produto de cada elemento do vetor de prioridade pelo total da respectiva coluna da matriz comparativa (A) e n o número de critérios avaliados. O IC é importante para assegurar que os julgamentos aplicados a cada um dos critérios (na construção da matriz A) são consistentes e que a ponderação final é coerente. Conforme Saaty (1980), o IC calculado deve ser inferior a 0,10, caso contrário uma reavaliação da comparação deve ser realizada. A partir da ponderação dos critérios e subcritérios concluída, inicia-se o processo de construção da superfície de custo acumulado, como descrito na Subseção 2.2.3.

2.2.3 Construção da superfície de custo acumulado

Em uma grade matricial $N \times M$ e resolução espacial de 100 m, inicia-se o processo de otimização do traçado de LTEE. Nessa etapa é calculado o custo acumulado de cada célula a partir de um ponto de partida (início do traçado)

até o ponto de destino, ou seja, sendo definido um ponto s (ponto inicial do trajeto) e de um ponto d (final do trajeto), a superfície de adequabilidade é discretizada em um grafo ponderado e não direcionado $G = (V, L)$, modelando todos os caminhos possíveis entre os pontos $s \in V$ e $d \in V$. O conjunto de vértices (V) de G consiste nos centros de cada célula da superfície de adequabilidade, conforme Equação 7:

$$v_{i,j} \in V \subseteq R^2, i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, M\}, \quad (7)$$

O conjunto de arestas (L) denotam as relações existentes entre vértices vizinhos (as arestas relacionam cada vértice com seus oito vértices vizinhos), conforme Equação 8 (BACHMANN, 2018):

$$a_{i,j,k,l} = \{v_{i,j}, v_{k,l}\} \vee v_{i,j}, v_{k,l} \in V, |k - i| = 1 \vee |l - j| = 1, \quad (8)$$

As arestas ($a \in L$) de G são ponderadas com um peso positivo ($w(a)$ - custo médio de atravessamento pelo empreendimento entre dois pixels vizinhos multiplicado pela resolução do modelo espacial). O caminho em G é uma sequência de arestas (a_1, \dots, a_k), tal que (BACHMANN, 2018):

$$|a_i \cap a_{i+1}| = 1 \quad (9)$$

Em que $1 \leq i \leq k - 1$

Dentro do conjunto (β) de caminhos possíveis entre os pontos $s = v_{i,j}$ e $d = v_{k,l}$ com $i, k \in \{1, \dots, N\}$ e $j, l \in \{1, \dots, M\}$, o custo de um caminho $r \in \beta$ é definido pela Equação 10:

$$c(r) = \sum_{a \in r} w(a) \quad (10)$$

No processo de otimização de LT de energia elétrica os pesos são associados de acordo com o custo de atravessamento da célula da grade matricial pelo empreendimento. A rota ideal para o traçado será aquela que apresentar menores custos de atravessamento, isto é, determinar $p \in \beta$, tal

que $c(p) \leq c(q)$, para todo $q \in \beta$. Neste trabalho, o processo de otimização consiste em minimizar a função objetivo apresentada na Equação 11, como segue:

$$\text{min} z = \sum_{\substack{\text{para todas as} \\ \text{arestas definidas } (i,j)}} w_{ij} x_{ij}$$

Em que:

$$x_{ij} = \begin{cases} \text{quantidade de fluxo na aresta}(i,j) \\ 1, \text{ se a aresta } (i,j) \text{ for o mínimo;} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (11)$$

A definição automática do traçado otimizado foi realizada a partir da aplicação do algoritmo de Dijkstra (1959), como descrito na Subseção 2.2.4.

2.2.4 Otimização do traçado da LTEE

O algoritmo de Dijkstra (1959) se aplica em grafos orientados ou não, admite que todas as arestas possuem pesos não negativos e é suposto que exista pelo menos um caminho entre o ponto de partida e de destino. Seja c_i o custo mínimo de atravessamento do vértice de origem s ao vértice i , e define-se $c_{ij} (\geq 0)$ como o custo de atravessamento da aresta (i, j) , o algoritmo define o rótulo para o vértice posterior, j , conforme Equação 12 (TAHA, 2008):

$$[c_j, i] = [c_i + c_{ij}, i], c_{ij} \geq 0 \quad (12)$$

O algoritmo se baseia no processo de rotulação dos vértices. O rótulo inicial é definido como $[0, -]$, indicando que não existe um vértice predecessor ao vértice raiz (s). Os demais vértices são classificados como temporários. O vértice que apresentar a aresta com o menor custo de atravessamento (c_{ij}) é rotulado como vértice permanente. A partir deste processo o algoritmo ajusta sucessivamente a estimativa do caminho que gere custo mínimo.

Segundo Ahuja, Magnanti e Orlin (1993) diversos problemas do mundo real podem ser modelados com a aplicação do algoritmo de Dijkstra (1959)

como por exemplo nos setores de transportes e telecomunicações, nos quais se busca enviar uma mensagem ou um veículo entre duas posições geográficas de forma eficiente e otimizada. Ademais, o algoritmo pode ser aplicado em processos de planejamento de tráfego urbano e também no planejamento de projetos de empreendimentos lineares (rodovias, ferrovias, LTEE, dentre outros). Na Seção 3 são apresentados os resultados e discussões.

3 Resultados e discussões

Esta Seção descreve os experimentos realizados e discute os resultados obtidos. Para avaliar a metodologia foram realizados dois estudos de caso localizados no estado do Paraná, sendo escolhidas áreas que apresentassem LTEE existentes: 1) Cenário 1 - LTEE de 530 kv que interliga as Subestações (SE) de Sarandi (SDI) a SE de Londrina (LNA) e 2) Cenário 2 - LTEE de 230 kv que interliga a SE de Figueira (FRA) à SE de Ponta Grossa Norte (PNG). A ponderação obtida no processo de MEM é apresentada na Subseção 3.1. Os resultados alcançados são descritos para os Cenário 1 e 2, respectivamente, nas Subseções 3.2 e 3.3. Na Subseção 3.4 são discutidos os resultados.

3.1 Modelagem espacial multicriterial

O resultado do processo de ponderação das variáveis utilizadas é apresentado na Tabela 1. Observa-se que os critérios utilizados no processo de otimização foram divididos em três grupos: social, ambiental e econômico. A divisão dos critérios em grupos intermediários foi realizada para simplificar o processo de ponderação das variáveis, uma vez que quanto maior o número de critérios considerados em um mesmo processo, maior a possibilidade de geração de inconsistências.

O processo de ponderação foi realizado em três etapas: (1) ponderação de cada grupo com a aplicação do método AHP; (2) ponderação de cada critério utilizando o método AHP e; (3) ponderação dos subcritérios de cada variável a partir da escala de adequabilidade proposta por EPRI (2006). Os pesos finais

foram definidos a partir da multiplicação dos valores encontrados em cada etapa do processo de ponderação, obtendo-se o valor de adequabilidade para cada critério considerado (coluna nominada de total - Tabela 1).

Tabela 1– Ponderação total

Grupo	AHP	Critério	AHP	Subcritério	EPRI	TOTAL	
Social	42	Áreas urbanas	25	-	9	9450	
		Assentamento rural	35	-	9	13230	
		Uso do solo	20	Construído		9	7560
				Vegetação		5	4200
				Agricultura		3	1680
				Solo Exposto		1	840
		Proximidade de áreas urbanas	20	90 m		9	6720
				180 m		5	5880
				270 m		3	4200
				360 m		2	3360
Ambiental	36	Remanescente Florestal	28	-	7	11340	
		APA	36	-	9	17820	
		Área indígena e Quilombola	36	-	9	17820	
Econômico	22	Empreendimento lineares	32	-	1	5346	
		Áreas alagadas	27	-	9	704	
		Declividade	21	0-15%		1	462
				15,01-30%		2	924
				30,01-45%		5	2310
				>45%		9	4158
		Mapa de vento	12	0 - 1,5 m/s		4	1056
				1,51-3,0m/s		3	792
3,01-4,5 m/s				2	528		
>4,5 m/s				1	264		

Fonte: Elaborada pelos autores.

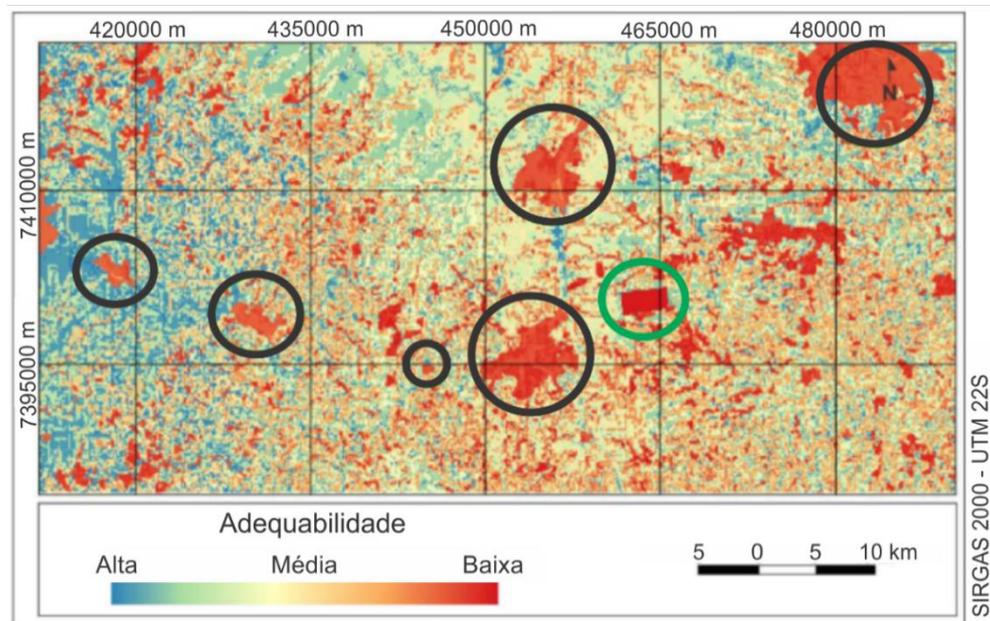
Observa-se que os critérios que exerceram maior influência no processo de definição de diretrizes de LTEE são os pertencentes ao grupo social e ambiental, uma vez que inserem maiores restrições e custos no processo de construção. Para a validação das ponderações foram consultados dois técnicos responsáveis pela definição de traçado de diretrizes de LTEE, ambos consideraram a atribuição dos pesos consistente e passíveis de aplicação.

Com a atribuição dos pesos a cada critério e subcritério, inicia-se o processo de reclassificação das imagens, em que as células da base matricial são reclassificadas de acordo com os pesos apresentados na Tabela 1. Após a realização do processo de reclassificação dos critérios e subcritérios, iniciou-se o processo de construção da superfície de adequabilidade. Na Subseção 3.2 são apresentados os resultados relacionados a construção das superfícies de adequabilidade para o Cenário 1.

3.2 Cenário 1 – LTEE 530 kv (SE SDI – LNA)

O processo de construção da superfície de adequabilidade foi realizado a partir da aplicação da soma das superfícies intermediárias (ambiental, social e econômica) realizando o processo denominado de álgebra de mapas. O resultado é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Superfície de adequabilidade



Fonte: Elaborada pelos autores.

Observa-se (Figura 2) que as áreas de menor adequabilidade para o recebimento do empreendimento foram as áreas urbanas (destacadas com

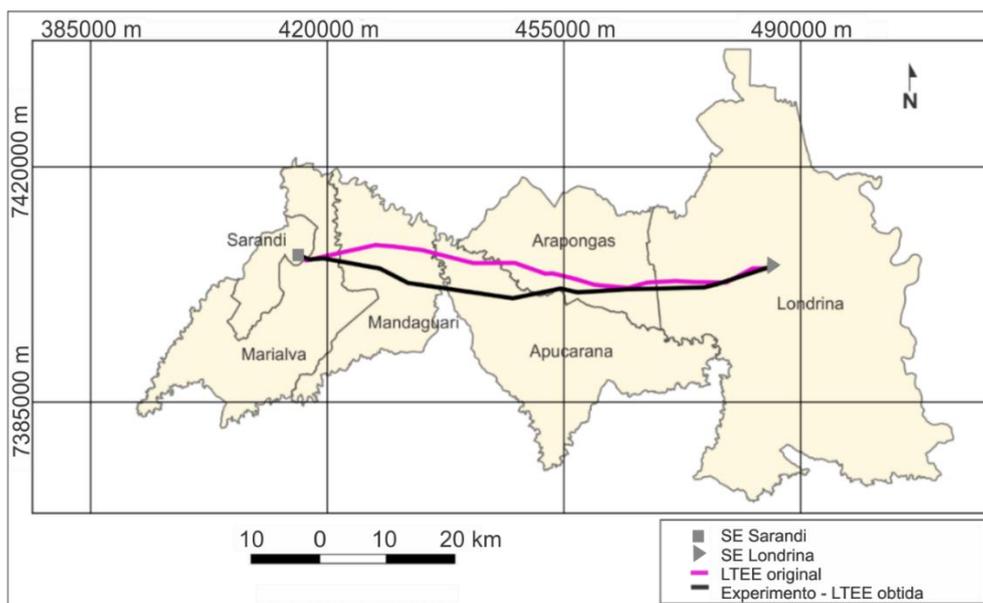
círculos pretos) e a área que compreende o assentamento rural Dorcelina Folador (destacada com o círculo em verde) seguidas por áreas de preservação ambiental e remanescentes florestais.

A partir da superfície de adequabilidade se inicia o processo de construção da superfície de custo acumulado, a partir do conhecimento das posições geográficas de dois pontos, ponto de início (SE SDI) e de destino (SE LND) do traçado. Esse processo é responsável por calcular o custo acumulado de todos os caminhos possíveis desde a origem até o ponto final do traçado, definido pelo analista. Os traçados otimizados obtidos para o Cenário 1 e 2 são apresentados, respectivamente, na Subseção 3.2.1 e 3.2.2.

3.2.1 Obtenção do traçado otimizado (Cenário 1)

Com a construção da superfície de custo acumulado é possível a aplicação de algoritmos de otimização para a definição do caminho que apresente o custo mínimo de atravessamento. Neste trabalho foi aplicado o algoritmo de Dijkstra (1959) para o estabelecimento da diretriz preferencial (ilustrada na Figura 3).

Figura 3 – Resultado do traçado otimizado

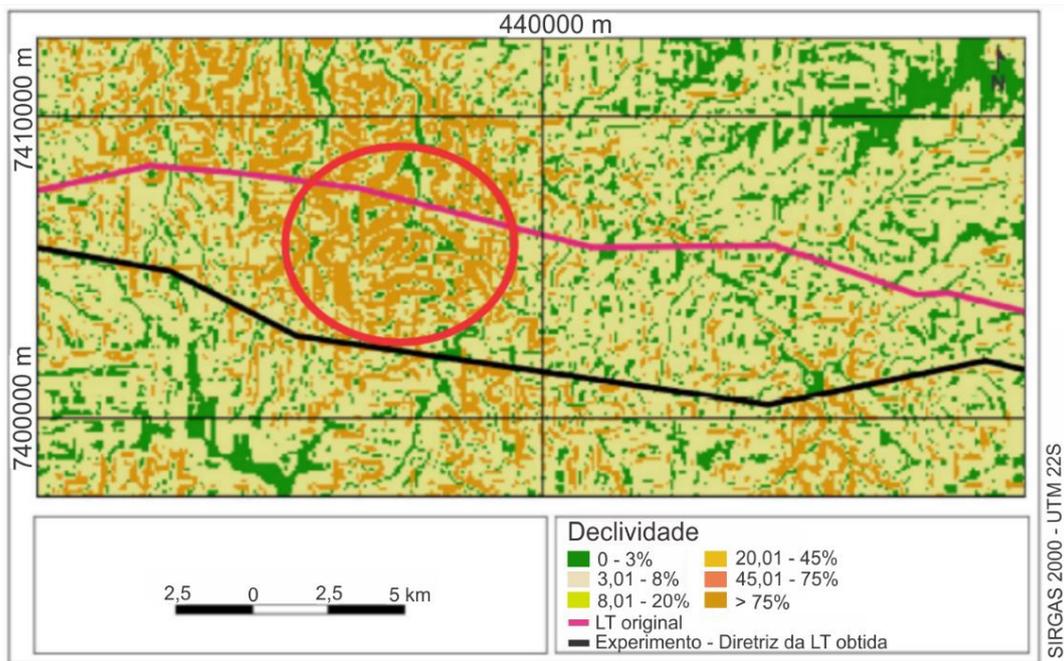


Fonte: Elaborada pelos autores.

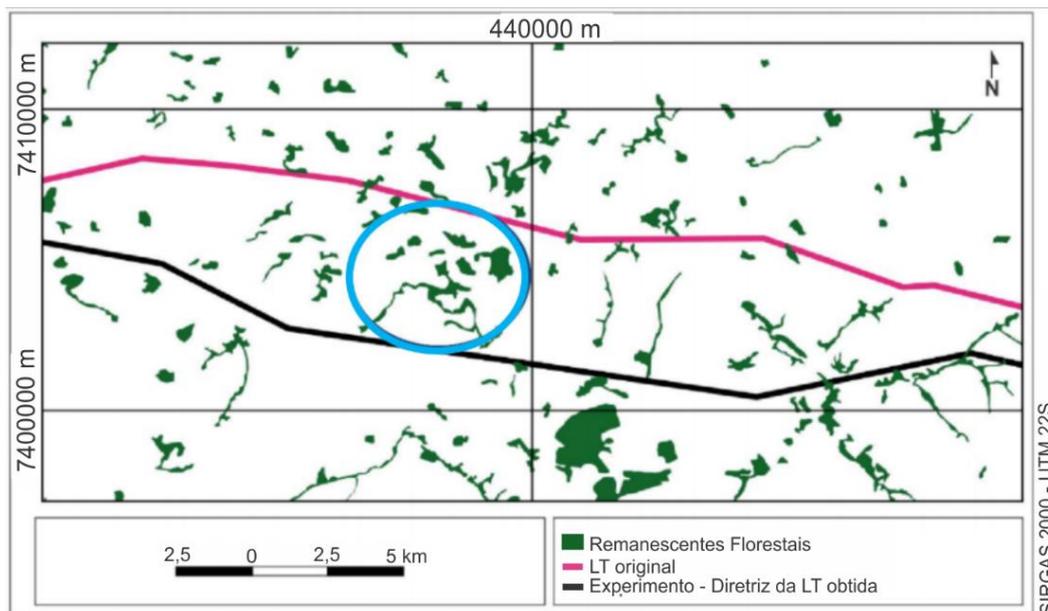
Observa-se na Figura 3 que o traçado obtido com o processo de modelagem espacial apresenta semelhanças com o traçado da LTEE existente na região, porém, não são completamente coincidentes. A principal diferença entre os traçados está localizada entre os municípios de Apucarana e Mandaguari. Essa discrepância foi originada devido à consideração de dois critérios: declividade e remanescentes florestais, como ilustrado, respectivamente, na Figura 4a e 4b.

Observa-se que o algoritmo de otimização buscou desviar das localidades com maiores percentuais de declividade (Figura 4a), área destacada pelo círculo em vermelho. Além disso, observa-se a presença de remanescentes florestais, áreas com restrições de passagem no processo de definição do traçado de diretrizes de LTEE, (Figura 4b), círculo azul.

Figura 4 – Diferença entre os traçados no Cenário 1 (a) Influência da declividade (b) Influência de remanescentes florestais



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelos autores.

Além da análise visual, os traçados foram comparados quantitativamente em relação as três perspectivas consideradas neste trabalho: social, ambiental e econômica. Para a realização do processo de análise quantitativa foram definidos indicadores para cada dimensão, como apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Indicadores para a análise quantitativa

Perspectiva	Indicadores
Social	Os impactos causados nesta perspectiva foram avaliados a partir da quantificação do comprimento da rota de cada experimento em áreas urbanas, periurbanas e assentamentos rurais.
Ambiental	Os impactos ambientais são computados a partir da determinação da dimensão linear do traçado em áreas de conservação ambiental e remanescentes florestais.
Econômico	Os impactos econômicos foram quantificados a partir da análise das dimensões lineares totais dos traçados obtidos e a declividade média do terreno.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados da análise quantitativa são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2– Análise Quantitativa – Cenário 2

Perspectiva	Fatores	LT original	Experimento
Social	Impacto em áreas urbanas	0, 00 km	0, 00 km
Ambiental	Impacto em remanescentes florestais	4, 58 km	1, 81 km
	Impacto em áreas de conservação	0, 00 km	0, 00 km
Econômico	Comprimento	75,50 km	76,50 km
	Declividade Média	20,70 %	10,98 %

Fonte: Elaborada pelos autores.

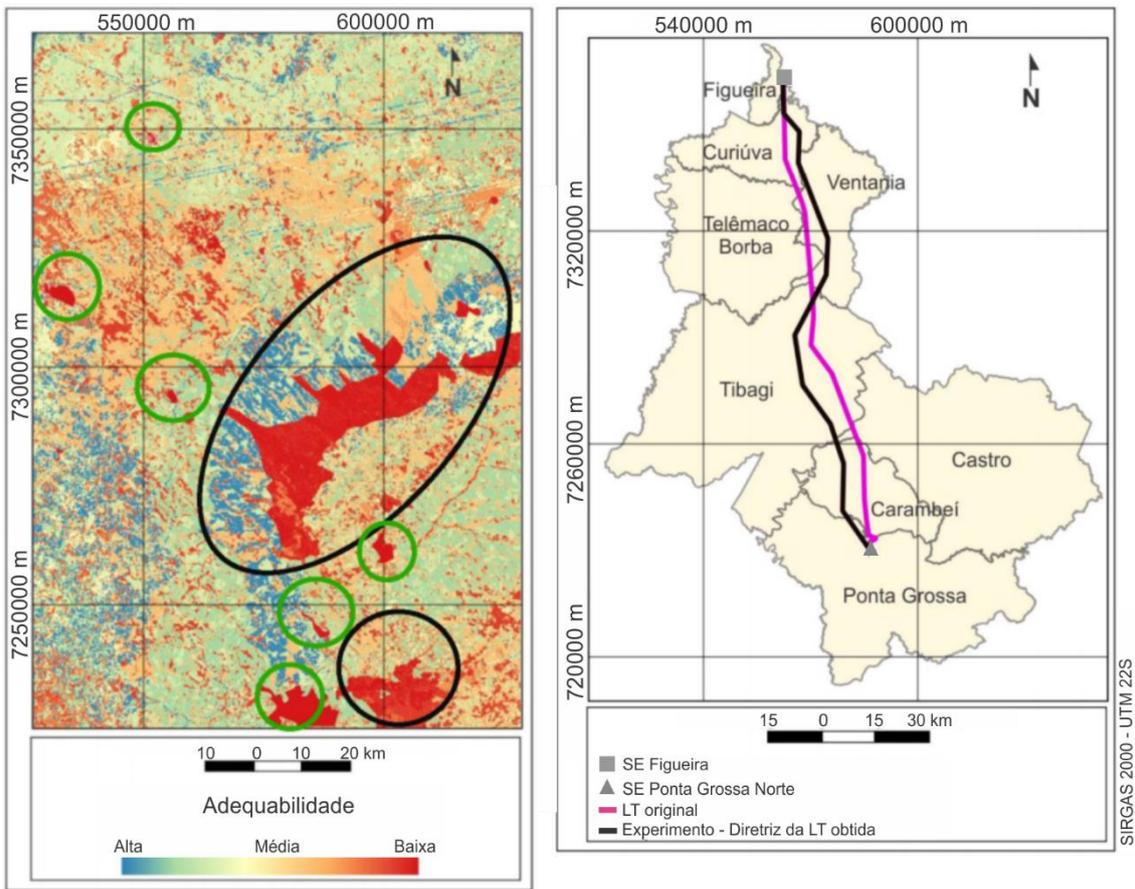
Ambos os traçados não atravessaram áreas urbanas ou periurbanas, áreas de conservação ambiental e desviaram do Assentamento Rural Dorcelina Folador, localizado no município Paranaense de Arapongas. Áreas de remanescentes florestais foram atingidas por ambos os traçados, porém a extensão linear do traçado da diretriz de LTEE no interior de remanescentes florestais, obtida no processo de MEM, apresentou-se 39% menor quando comparada com o traçado da LTEE original. Além disso, o traçado obtido com o método proposto atravessou áreas com menores porcentagens de declividade.

3.3. Cenário 2 – LT 230 kv (FRA – PGN)

Um segundo experimento foi realizado para testar o mesmo processo de ponderação em áreas com características distintas. O Cenário 2 compreende a área de influência da LTEE que liga SE FRA à SE PGN. Os mesmos processos aplicados ao Cenário 1 foram replicados no Cenário 2, obtendo-se os resultados ilustrados na Figura 5.

Na Figura 5a as áreas representadas pela cor vermelha são inadequadas para a implantação de uma LTEE. No Cenário 2, áreas de conservação ambiental apresentou o menor nível de adequabilidade (círculos em preto) bem como áreas urbanas (círculos em verde), uma vez que se deve evitar a passagem de LTEE nestas regiões.

Figura 5 – (a) Superfície de adequabilidade (b) Resultado do traçado otimizado



(a)

(b)

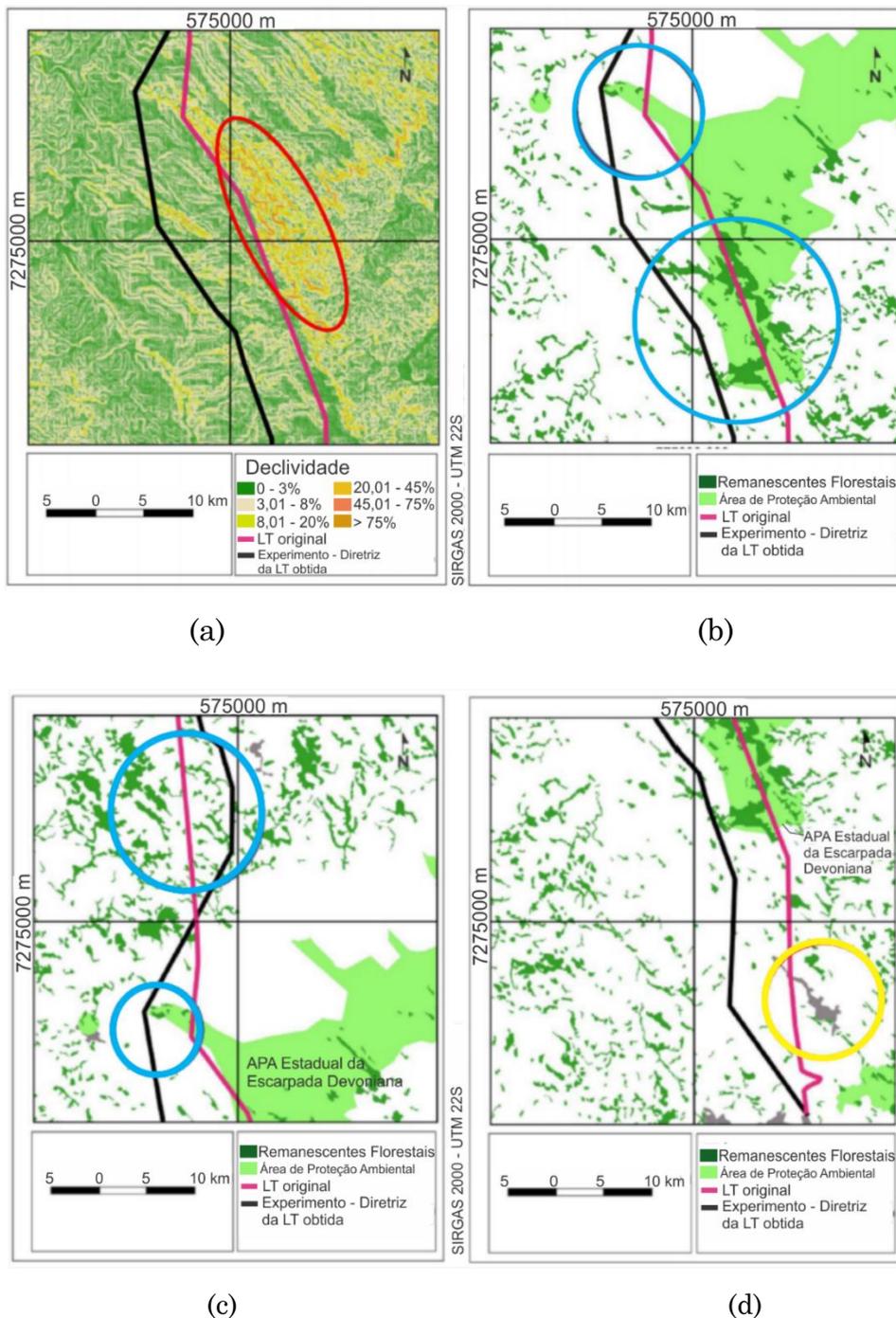
Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir da superfície de adequabilidade foi construída a superfície de custo acumulado. Para a sua construção foi considerada a localização da SE FRA como ponto inicial e a localização da SE PGN como ponto final do empreendimento. O algoritmo de Dijkstra (1959) foi aplicado para a definição do traçado otimizado (Figura 5b). Semelhante ao Cenário 1, as diferenças entre o traçado original e o otimizado ocorreram devido a topografia, áreas de preservação ambiental, remanescentes florestais e áreas urbanas (Figura 6).

Na Figura 6a, observa-se que ambos os traçados desviaram das áreas com maiores declividades, porém devido à presença de áreas de preservação ambiental o traçado obtido a partir da MEM foi deslocado para áreas a oeste do traçado original, como se observa nas Figuras 6b e Figuras 6c. Além disso,

o traçado original atravessa uma região urbana (área destacada com o círculo em amarelo), fato que não ocorre no traçado definido com o método discutido neste trabalho.

Figura 6 – Diferença entre os traçados Cenário 2 (a) Declividade (b) Áreas de Preservação ambiental (c) Remanescentes florestal (d) Área urbana



Fonte: Elaborada pelos autores.

A análise quantitativa dos resultados para o Cenário 2 é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3– Análise Quantitativa – Cenário 2

Perspectiva	Fatores	LT original	Experimento
Social	Impacto em áreas urbanas	1, 00 km	0, 00 km
Ambiental	Impacto em remanescentes florestais	12, 87 km	5,20 km
	Impacto em áreas de conservação	25, 00 km	0, 00 km
Econômico	Comprimento	139,40 km	142,56 km
	Declividade Média	8,94 %	8,91 %

Fonte: Elaborada pelos autores.

Observa-se na Tabela 3 que ambos os traçados cortaram remanescentes florestais, porém a extensão linear do empreendimento no interior destas áreas é 40% menor quando comparado com o traçado original.

3.4 Discussão dos resultados

Utilizando a MEM os analistas podem definir regiões que apresentem as características necessárias para o desenvolvimento do projeto, considerando automaticamente diversos critérios relevantes no processo de planejamento de diretrizes de LTEE que manualmente seria improvável de serem considerados. A partir da MEM é possível realizar análises no entorno do traçado obtido para a identificação de possíveis problemas ou definição de soluções alternativas. Observa-se que em ambos os cenários o traçado obtido para uma diretriz de LTEE é coerente e apresenta semelhanças com o traçado original.

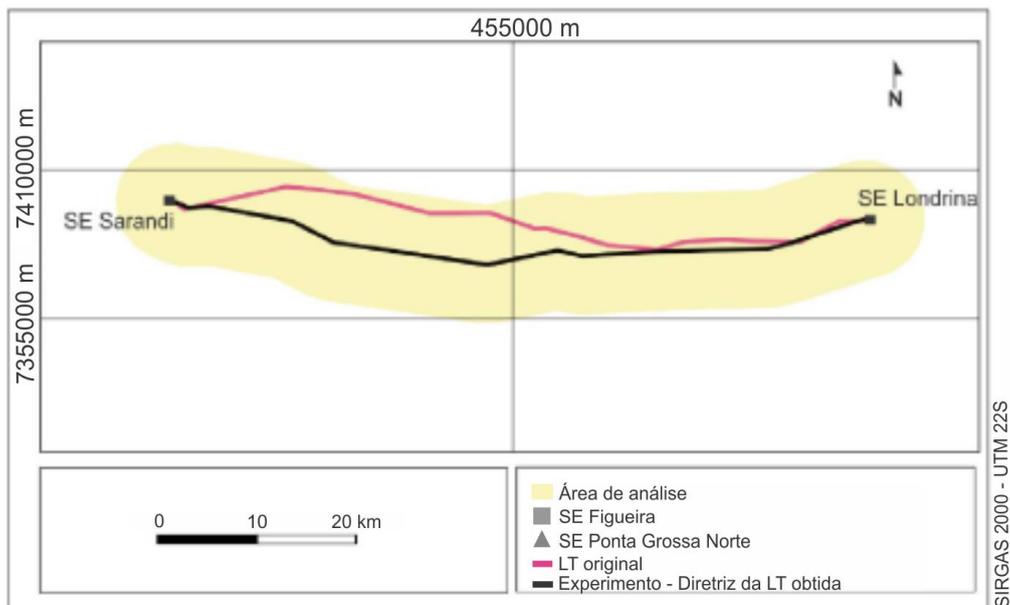
Destaca-se que este processo (aplicação da MEM) é sugerido para auxiliar na etapa de planejamento, sendo suficiente a determinação de um traçado inicial para orientar os analistas no processo de decisão e definição do traçado da diretriz permanente. O processo de planejamento envolve um

conjunto de interesses conflitantes e o traçado deve ser modificado de acordo com as melhores alternativas para cada parte envolvida neste processo. É importante que além da definição de um traçado preferencial, seja possível a definição de uma área de análise, na qual os técnicos responsáveis por essa etapa possam analisar as características da região e os possíveis obstáculos.

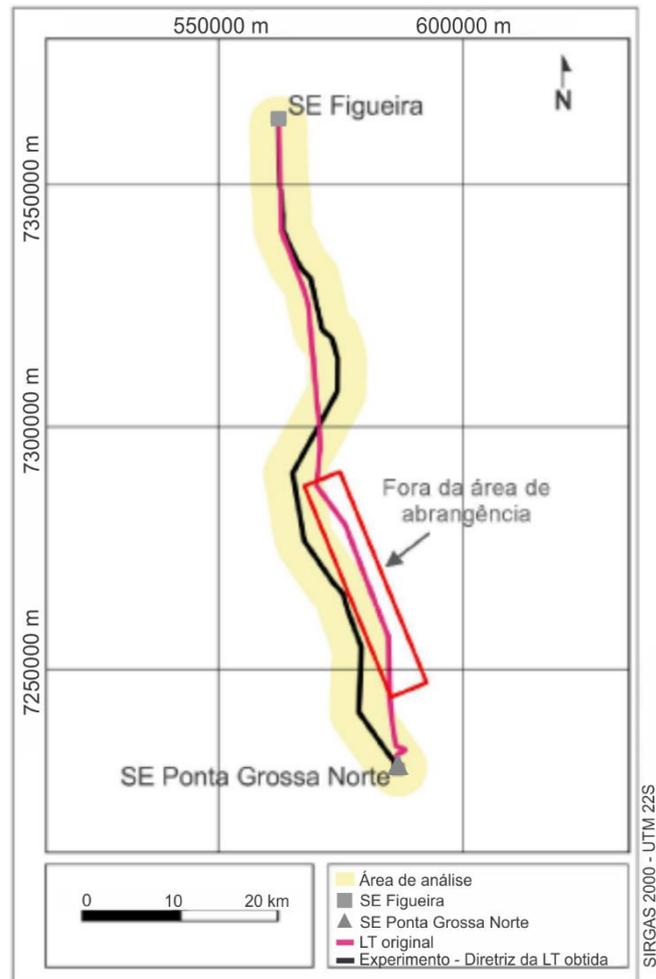
Nos estudos de caso em questão, foram definidas áreas de análise (corredores de LTEE) de 5 km ao redor do traçado da diretriz da LTEE obtida com o processo de modelagem (2,5 km para cada lado). No Cenário 1 o traçado original apresenta-se inteiramente dentro da área de abrangência definida (Figura 7a).

No Cenário 2 devido a área apresentar maiores restrições relacionadas ao processo de definição de diretrizes de LTEE a taxa de sucesso foi menor que no Cenário 1, porém os resultados foram positivos: 65% da LTEE original se apresentam no interior da área de abrangência (Figura 7b). Isto ocorreu devido a consideração da Área de Proteção Ambiental (APA) da Escarpada Devoniana (Figura 6) como fator de restrição.

Figura 7 – Área de análise (a) Cenário 1 (b) Cenário 2



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelos autores.

Observa-se ainda que o sucesso da modelagem está diretamente relacionado as variáveis geográficas selecionadas para a composição do MEM, uma vez que serão essenciais para a definição da rota otimizada no final do processo. Dentre as variáveis utilizadas neste trabalho, áreas urbanas, proximidades de áreas urbanas, áreas de conservação ambiental, remanescentes florestais e declividade foram as classes que realizaram maior influência na definição do traçado da diretriz otimizada.

Na Seção 4 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

4 Conclusões

O modelo espacial conceitual proposto para a definição do traçado de diretrizes de LTEE se mostrou eficiente e de possível aplicação no processo de planejamento de definição de uma nova LTEE, uma vez que os traçados obtidos no processo de MEM apresentaram similaridade com os traçados existentes e utilizados para a validação do modelo proposto. As diferenças ocorreram principalmente devido a consideração de áreas como remanescentes florestais que foram utilizadas no processo de modelagem como áreas de restrição, modificando algumas partes de ambos os traçados.

Das três perspectivas consideradas neste trabalho, a social e ambiental foi significativa, uma vez que são as principais restrições a serem consideradas no processo de definição do traçado de diretrizes de LT de energia elétrica. Devido às exigências legais, deve-se moldar o empreendimento de acordo com a disposição espacial de áreas habitadas e de preservação ambiental localizadas na área de abrangência do empreendimento. Os aspectos econômicos também devem ser considerados, porém apresentam menor influência na definição do traçado de diretrizes quando comparado com as perspectivas sociais e ambientais.

Recomenda-se para trabalhos futuros a incorporação e a análise de diferentes critérios no processo de modelagem. Observou-se que as variáveis utilizadas neste trabalho foram suficientes para a definição de uma diretriz de LT de energia elétrica inicial, porém com a inserção de dados como o valor da terra, propriedades afetadas pelo empreendimento, áreas de valor cultural e definição da monetização das variáveis podem auxiliar na definição de diretrizes mais realistas. Além disso, fatores técnicos restritivos, como tipo de solo e ângulos de deflexão podem auxiliar no processo de otimização.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - (Número do Processo: 1689032).

Contribuição dos autores

Este artigo foi desenvolvido a partir das pesquisas realizadas no mestrado acadêmico do autor principal, sob orientação do coautor. Com isso, a execução do trabalho foi realizada por Fabiano Peixoto Freiman e Daniel Rodrigues dos Santos auxiliou no desenvolvimento, na contribuição de ideias para o trabalho e correções finais.

Referências

- ASSI, H. et al. Gis-Based Multicriteria Evaluation Approach for Corridor Siting. **Environment And Planning B: Planning and Design**, v. 39, n. 2, 2012 pp 287-307.
- AHUJA, R. K; MAGNANTI, T. L; ORLIN, J. B. **Network Flows: Theory, Algorithms and Applications**. 1ª ed. New Jersey. Editora Prentice-Hall. 1993, 846p.
- BACHMANN, D. et al. Multi-Objective Optimisation Based Planning of Power-Line Grid Expansions. **ISPR, International Journal of Geo-information**, v. 7, n. 7, 2018 pp. 258-280.
- BAGLI, S., et al. Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. **Environmental Impact Assessment Review**, [s.l.], v. 31, n. 3, 2011 pp. 234-239.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriterial evaluation to minimize environmental impacts in connexion with graphs'. **Numerische Mathematik**, v. 1, 1959 pp. 269-271.

- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Site : [http://www.dnit.gov.br/mapas multimodais/shapefiles](http://www.dnit.gov.br/mapas_multimodais/shapefiles), acesso em outubro de 2018.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Diretrizes para a elaboração dos relatórios técnicos referentes às novas instalações da rede básica.** Brasília, 2005.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano decenal de expansão de energia elétrica 2026.** Brasília, 2018a.
- EPRI, Electric Power Institute. **Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology.** EPRI, Palo Alto, CA, and Georgia Transmission Corporation, Tucker, GA, 2006.
- GRASSI, S. et al. A GIS-Based Process for Calculating Visinility Impact from Buildings During Transmission Line Routing. **Connecting A Digital Europe Through Location And Place**, 2014, pp. 383-402.
- IAP, Instituto Ambiental do Paraná. Site: <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-756.html>, acesso em outubro de 2018.
- INCRA, Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. Site: : <http://www.acervofundiario.incra.gov.br>, acesso em novembro de 2018.
- INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Site: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>, acesso em outubro de 2018.
- LI, Y. et al. Optimization of Transmission-Line Route Based on Lightning Incidence Reported by the Lightning Location System. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 3, 2016 pp. 1460-1468.
- LIMA, R. M. et al. Least-cost path analysis and multi-criteria assessment for routing electricity transmission lines. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, n. 16, 2016 pp. 4222-4230.
- LISTONE, H; TUROFF, M. **The Delphi method: Techniques and applications.** 1ª ed. California. University of Southern California, 2002. 620p.
- MIRANDA, E. E., de; (Coord.). **Brasil em relevo.** Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 15 out. 2018.

- MONTEIRO, C. et al. GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, 2005 pp. 934-942.
- POHEKAR, S. D, RAMACHANDRAN, M. E. F., Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 8, n. 4, 2003, pp. 365-381.
- SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. McGraw-Hill, New York, NY, 1980.
- SHU, J. et al. A New Method for Spatial Power Network Planning in Complicated Enviroments. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 27, n. 1, 2012, pp. 381-389.
- TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8^a ed. São Paulo. Editora Education do Brasil, 2008. 360p.
- THIAM, F. B., DEMARCO, C. L. Automated Transmission Expansion and Routing Incorporating Electric and Geographic Criteria. **IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference**, 2016, pp. 1-5.