

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais**

Pedro Bueno Rocha Campos

**MODELAGEM DE CORREDORES ÓTIMOS PARA LINHAS AÉREAS DE
TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Belo Horizonte
2014**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais**

Pedro Bueno Rocha Campos

**MODELAGEM DE CORREDORES ÓTIMOS PARA LINHAS AÉREAS DE
TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas
Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais
como requisito para obtenção do título de mestre em
Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.**

**Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro
Co-Orientador: Rodrigo Affonso de Albuquerque
Nobrega**

**Belo Horizonte
2014**

C198m 2014	<p>Campos, Pedro Bueno Rocha. Modelagem de corredores ótimos para linhas aéreas de transporte de energia elétrica [manuscrito] / Pedro Bueno Rocha Campos. – 2014. x, 49 f.: il.(color.)</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2014. Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro. Co-Orientador: Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega. Bibliografia: f. 47-49.</p> <p>1. Energia elétrica – Transmissão – Teses. 2. Linhas elétricas – Teses. 3. Energia elétrica – Aspectos ambientais – Teses. I. Elmiro, Marcos Antônio Timbó. II. Nóbrega, Rodrigo Affonso de Albuquerque. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. IV. Título.</p> <p>CDU: 621.315</p>
---------------	---

Dissertação defendida e aprovada em, 13 de abril de 2014, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Prof. Dr. Ricardo Alexandrino Garcia
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues
Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Jéssica,

Dedico a você tudo que de bom vier a ser fruto deste trabalho e esforço, na
forma dos melhores sentimentos que existem em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais uma oportunidade, pela força e pelo amor que me conduz.

Agradeço aos meus Pais, Pedro e Vanessa, aos meus Irmãos, Ana Eugênia, Felipe e Igor, e a toda minha família que me deram mais que a vida, possibilitaram, através de tudo que me oferecem, a concluir mais este compromisso que assumi. Amo vocês, muito obrigado.

Agradeço a Jessica que me deu esperança, amor e confiança. Sim, esperança na vida, amor à família e confiança em Deus. Como também agradeço a toda a sua família que me recebeu como filho, irmão, sobrinho, primo e tudo com muito carinho.

Agradeço aos professores Timbó, Rodrigo, Ricardo, Silvio e Raoni pelas orientações e ensinamentos que mudaram a minha forma de perceber o mundo.

Agradeço a CEMIG, aqui representada pela Francely, que confiou em mim e me concedeu esta oportunidade. Ao Evandro, Guilherme, Marco Antônio, Gilson, a Fernanda, a Simone e todos outros amigos que tive o prazer de conhecer trabalhando na CEMIG.

Agradeço ao Vinas, ao Douglas, ao Bim, a Luciana, ao Rafael e a todos os amigos que não se importam com o tempo nem com a distância para serem amigos.

Resumo

Demandado pela notória necessidade de crescimento econômico dos setores produtivos e de infraestrutura, o processo de construção das novas linhas de transporte de energia elétrica está em plena ascensão no país. Só em Minas Gerais, no período entre 2008 e 2012, a Cemig Distribuição SA, investiu mais de R\$ 3,3 bilhões em ampliações do sistema elétrico do estado. Os projetos deste setor de infraestrutura devem seguir regulamentações e controle para atender a critérios como baixo custo e baixos impactos socioambientais, os quais a princípio tornam-se conflitantes. Portanto, a aplicação de métodos que permitam prever rotas que atendam de forma otimizada a estes critérios é extremamente necessária. A Análise Multicritério associada à modelagem espacial da dinâmica da paisagem pode fornecer os elementos necessários para este objetivo. O presente trabalho busca, através da análise e extração de elementos da paisagem, otimizar o processo de planejamento de linhas de transmissão fazendo uso de padrões de execução de projetos de linhas já existentes. A análise dos padrões da paisagem é desenvolvida de forma multitemporal, e desta forma permite que o conhecimento acumulado ao longo dos anos de desenvolvimento desses projetos possa ser absorvido no modelo. Um modelo espacialmente explícito e dinâmico foi elaborado, tanto para estudar o comportamento espacial da locação de linhas de transmissão de energia na paisagem quanto para possibilitar a combinação de critérios para otimização de novos projetos, utilizando Análise Multicritério. Seu desenvolvimento utilizou metodologias robustas, como Peso de Evidências e *Least Costly Path*. Os resultados demonstram, a eficiência do método para identificação dos locais ideais para locação destes empreendimentos, bem como na oferta de subsídios comparativos e alternativas que otimizam os critérios conflitantes. Além disso, o método mostra-se eficiente na identificação de variáveis não consideradas nas tratativas normativas do setor para planejamento e construção de novos projetos de infraestrutura elétrica.

Palavras chave: Linhas de Transporte de Energia Elétrica, Pesos de Evidência, Regressão Logística, Análise Multicritério e Análise da Paisagem.

Abstract

Demanded by the notorious need for economic growth of the productive sectors and infrastructure, the process of construction of new transportation lines of electric energy is rising in the Brazil. In Minas Gerais for example, Cemig Distribution Co, has invested more than R\$ 3.3 billion in expansion of the electrical system between 2008 and 2012. Projects in infrastructure for power transmission must follow regulations in order to satisfy criteria such as low cost and low environmental impact, which at first become conflicting. Therefore, the use of methods to foresee routes that optimize those criteria is extremely necessary. The Multicriteria Analysis associated with spatial modeling of landscape dynamics can provide the necessary elements for this goal. This study aims to optimize the transmission lines planning process by using landscape pattern analysis with include patterns extracted from existing infrastructure projects. The landscape pattern analysis is multitemporal, so the knowledge accumulated over the years of development infrastructure projects is absorbed in the model. A spatially explicit and dynamic model was developed. The model enables to study the spatial behavior of the process in order to set the location on the landscape of transmission lines of energy. It also enables the combination of criteria for optimization of new projects using Multicriteria Analysis. The model employed robust methodologies, such as Weight of Evidence and Least Costly Path. The results demonstrate the efficiency of the method for identifying ideal places to locate the transmission lines. It provides comparative subsidies and alternatives that optimize the conflicting criteria. In addition, the method is effective to identify variables not considered in ordinary normative regulations in the sector used to plan and built new power infrastructure projects.

Keywords: Transportation Lines of Electric Energy, Weight of Evidence, Logistic Regression, Multicriteria Analysis and Landscape Analysis.

Lista de Figuras

Figura 1: Quadro de comparação entre alternativas, LT Oriximiná ó Cariri, 203 kV. (EIA, 2009).....	20
Figura 2: Esquema de Funcionamento do Modelo	26
Figura 3: Mapa de Localização da Área de Estudo	29
Figura 4: Gráfico da Função de W+ em relação à distância de LT existentes	30
Figura 5: Gráfico da Função ajustada de W+ em relação à distância de LT existentes .	31
Figura 6: Mapa de Probabilidade. Resultado da Calibração do Modelo. Figura a) após o filtro, figura b) sem o filtro.....	36
Figura 7: Mapa de Probabilidade Média	37
Figura 8: Resultado Validação do Modelo.....	39
Figura 9: Detalhe da Validação do Modelo.....	40
Figura 10: Traçado 1	42
Figura 11: Comparação entre o Traçado 2 (desconsiderando as variáveis teste) e o Traçado 3 (considerando as variáveis teste).....	43

Lista de Tabelas

Tabela 1: Descrição da Variáveis Utilizadas no Modelo	27
Tabela 2: Testes Estatísticos para o período entre antes de 1975 a 1975	34
Tabela 3: Testes Estatísticos para o período entre 1975 e 1984.....	34
Tabela 4: Testes Estatísticos para o período entre 1984 e 1990.....	35
Tabela 5: Testes Estatísticos para o período entre 1990 e 2000.....	35

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Apresentação	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Estruturação	12
2	FUNDAMENTAÇÃO	14
2.1	Políticas Públicas para o Setor Energético.....	14
2.2	Regulação do Sistema de Distribuição	15
2.3	Métodos de Análise Multicriterial para Modelagem Espacial.....	16
2.4	Análise Multicriterial no Planejamento de Linhas de Transmissão	18
2.5	Proposta de Modelagem Espacial para Linhas de Distribuição Utilizando Padrões Espaciais	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1	Base de Dados	26
3.2	Área de Estudo	28
3.3	Primeira Parte: Preparação do Dados	29
3.4	Segunda Parte: Calibração e Recálculo do Modelo	30
3.5	Terceira Parte: Validação do Modelo	31
3.6	Quarta Parte: Análise Multicritério	32
4	RESULTADOS	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
6	REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A expansão do sistema de distribuição¹ de energia elétrica requer a construção de novas linhas e redes que possuem custos e impactos socioambientais específicos quando implantadas. São empreendimentos de infraestrutura básica, necessários ao desenvolvimento de qualquer país e que atendem sem exceção a toda cadeia produtiva e econômica. A atividade de distribuição de energia elétrica, assim como todo o sistema elétrico nacional, é regulamentada desde a fase de planejamento até a fase de operação. Entretanto, a busca pelo menor impacto e melhor eficiência nos investimentos realizados nessa estrutura básica parecem questões conflitantes. O conhecimento de procedimentos que possibilitem a otimização entre o custo de implantação e a redução de impactos torna-se, então, significativo como instrumentos de política pública e privada.

O ambiente de decisão acerca de questões intrínsecas a projetos dessa ordem tem a necessidade do subsídio de informações detalhadas do meio onde serão inseridos. Para tanto, um modelo espacialmente explícito pode fornecer, não só as informações necessárias à implantação do empreendimento, mas também o funcionamento do sistema dinâmico que configura diversos ecossistemas que, por sua vez, poderão ser impactados e influenciar diretamente no planejamento e construção dos empreendimentos. Um modelo espacialmente explícito pode também fornecer padrões espaciais de projetos já implantados, oferecendo assim critérios comparativos para solução ótima apresentada, bem como no auxílio a identificação das variáveis que mais interferem na decisão sobre a locação do projeto.

O modelo proposto foi estruturado de forma multitemporal, pois considera o acúmulo de conhecimento na forma de projetar e construir linhas de transporte de energia. O conhecimento acumulado com a experiência é extraído através de metodologias consolidadas, como Pesos de Evidência e *Least Costly Path*, cuja base de

¹ As infraestruturas de transporte de energia elétrica recebem várias denominações de acordo com a função. As mais comuns são Linhas de Distribuição de Energia, Linhas de Transmissão de Energia e Linhas de Transporte de Energia. Para o estudo não haverá diferenciação, pois todas serão abrangidas.

dados é composta por uma série histórica de mais de vinte e cinco anos de implantação de linhas de transmissão de energia.

A proposição de soluções ótimas tem por embasamento a metodologia de Análise Multicritério, que irá associar, ao padrão espacial de ocorrência de linhas de transmissão na paisagem, variáveis que possam aproximar a redução do custo de implantação à redução de impactos socioambientais.

1.2 Objetivos

Dois pontos chave norteiam a proposta deste trabalho:

1. A necessidade de evolução das técnicas de planejamento e execução de obras de infraestrutura, através da incorporação de conhecimento de técnicas utilizadas no passado e sua adequação para o presente e futuro;
2. A possibilidade de resgatar o conhecimento de projetos passados através do uso de informações explícitas presentes na paisagem.

Portanto, o presente trabalho tem a proposta de indicar soluções ótimas à implantação de linhas de transporte de energia elétrica, considerando como critérios o menor custo e menor impacto socioambiental. Tem-se como expectativa do estudo promover a eficiência do planejamento do setor elétrico através da indicação de alternativas ótimas para os traçados de linhas, cujo grau de precisão não se aplica aos projetos executivos. É ainda intuito da pesquisa, indicar regras de interação entre os empreendimentos lineares com a paisagem dinâmica.

1.3 Estruturação

O trabalho está estruturado em seis capítulos, sendo, respectivamente, Introdução, Fundamentação, Materiais e Métodos, Resultados, Considerações Finais e Referências. O trabalho foi desenvolvido entre janeiro de 2013 e janeiro de 2014, e utilizou dados públicos e privados cedidos pela CEMIG. O seu desenvolvimento e

resultados encontrados contribuem para a formação e capacitação de recursos humanos e tecnológicos para o progresso do país.

2 FUNDAMENTAÇÃO

O presente capítulo tem a finalidade de promover o melhor entendimento acerca dos principais conceitos que são trabalhados neste estudo, como as políticas e regulamentações intrínsecas ao setor energético, metodologias que utilizam a modelagem espacial para definição do traçado de linhas de transmissão e o embasamento para a metodologia proposta por este trabalho.

2.1 Políticas Públicas para o Setor Energético

O processo de modernização e expansão em infraestrutura no Brasil segue a urgência de crescimento econômico e ganho de competitividade do país. É uma necessidade que visa aproximar o padrão econômico e de desenvolvimento do Brasil à realidade internacional. Essa possibilidade de ganho expressivo na escala de produção nacional, com custos e qualidade, equiparados aos praticados nos países já inseridos nesse quadro de desenvolvimento, poderá ampliar os limites de competitividade do país, não tão somente quanto ao simples aumento de renda, mas também em mudanças estruturais e institucionais regulatórias, com a incorporação do progresso técnico-científico na produção, agregando ainda, qualidade de vida e um crescimento sustentável à sociedade (FRISCHTAK e BRESSER-PEREIRA, 2008).

As taxas de investimentos públicos e privados em infraestrutura no período entre 2001 e 2008 foram na ordem de 2% ao ano do PIB nacional, enquanto que em países do Leste Asiático foram investidas taxas médias entre 4% e 6% ao ano do PIB e por períodos muito mais longos, cerca de 20 anos consecutivos. Da mesma forma, as taxas de crescimento econômico são bem diferentes entre os países (FRISCHTAK, 2008). Os investimentos no setor de energia elétrica não fogem a regra quanto aos investimentos em infraestrutura de modo geral. Entretanto, logo após a crise neste setor em 2001 e 2002, ocorreu uma tentativa de melhora na quantidade, estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico, com a criação de instituições voltadas ao estudo e planejamento da expansão energética, regulação da comercialização de energia elétrica e monitoramento contínuo da segurança na estabilidade do sistema eletroenergético. Os órgãos criados são, respectivamente, a Empresa de Pesquisa Energética - EPE, a Câmara de

Comercialização de Energia Elétrica - CCEE e o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico - CMSE (Lei 10.847/04).

Entre os estudos voltados ao planejamento estratégico de expansão do sistema elétrico, destaca-se o Plano Nacional de Energia 2030 - PNE 2030, que objetiva orientar as tendências e o planejamento geral para o setor elétrico, trazendo uma importante série histórica e perspectivas para até 2030. São elaborados também os Planos Decenais de Expansão de Energia - PNE e os Programas de Expansão da Transmissão - PET.

2.2 Regulação do Sistema de Distribuição

Já para a regulação e planejamento da distribuição de energia elétrica temos melhores definições nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, documento elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, em 2008. O PRODIST tem como objetivo garantir que o sistema de distribuição opere com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade, sendo estruturado em oito módulos, abrangendo as etapas de planejamento, acesso ao sistema, medição e qualidade. No módulo específico para o planejamento são encontradas as seções que definem os procedimentos para o cálculo da previsão de demanda de expansão, os critérios e os estudos de planejamento, análises comparativas entre o planejado e o realizado e por último a definição de um sistema de informações georreferenciadas para fiscalização das informações apresentadas (ANEEL, 2013).

Devem ser apresentados, entre os estudos destinados ao planejamento, os relatórios de viabilidade técnica, econômica e financeira dos empreendimentos a serem construídos dentro do plano de expansão. O PRODIST define diretrizes gerais para a elaboração dos estudos, com critérios mínimos de informações que devem ser apresentadas para cada tipo de empreendimento. Em resumo, o que define a viabilidade do investimento, para o regulador, é que o projeto atenda às normas técnicas que garantem a qualidade e confiabilidade do sistema ao menor custo global, observando-se ainda a legislação ambiental, os custos com o processo de licenciamento e os custos com a implantação das medidas mitigatórias, quando necessário.

São várias as normas que definem os parâmetros de projeto e aspectos construtivos do sistema elétrico. Em geral, linhas de distribuição de energia elétrica em alta tensão, são empreendimentos lineares, com estruturas metálicas de suporte e alteamento dos cabos condutores e para-raios, essas linhas operam em tensão nominal entre 34 kV e 138 kV, acima de 138 kV a operação é do sistema de transmissão. Possuem uma faixa administrativa não edificante de segurança conforme o uso e ocupação da superfície da área impactada, a tensão nominal e o relevo (NBR 5.422, 1985). É usual para tensões entre 69 kV e 138 kV a utilização de uma faixa de servidão administrativa com largura média de 23 metros, sendo 11,5 metros a partir do eixo central do traçado. O processo construtivo tem etapas bem definidas, compreendendo as fases de planejamento, projeto básico, projeto executivo, levantamento topográfico cadastral da área impactada, valoração da área impactada, liberação da faixa de servidão, supressão da vegetação e limpeza da faixa, fundação e instalação das estruturas, lançamento dos cabos, comissionamento e energização da linha (EIA, 2009).

A definição do traçado de uma Linha de Distribuição (LD) ocorre ainda na fase de planejamento do projeto. Segundo Labegalini et al (1992) e conforme a NBR-5.422 (1985), a viabilidade técnica do trajeto da LD deve considerar a tensão nominal, o relevo, o material a ser utilizado (condutores e suportes), a condição de fundação (solo, profundidade e afloramentos), qual o tipo de uso e ocupação da superfície para o cálculo da distância do cabo ao solo, a existência de travessias de rios e rodovias e a velocidade do vento. Não existem critérios normatizados para o estudo de impactos ambientais, sociais e econômicos para este tipo de empreendimento, fato este que não impede o estudo e o cálculo desses impactos.

2.3 Métodos de Análise Multicriterial para Modelagem Espacial

A fase de planejamento do empreendimento tem por objetivo indicar a viabilidade do projeto e propor a melhor solução para a sua realização. Quanto a linhas de transporte de energia elétrica tem-se a importante fase de seleção e elaboração de alternativas para o traçado, ou seja, local onde o empreendimento será construído e onde irá impactar a paisagem. Para indicação da melhor solução existem várias metodologias que foram elaboradas visando à redução do custo e dos impactos

negativos em consequência da implantação do projeto. Foram elencadas algumas das metodologias para traçar empreendimentos lineares, entre as quais, destacam-se:

- A metodologia ELECTRE - *Élimination Et Choix Traduisant la Réalité*, foi desenvolvida na década de 1960 e é baseada na comparação de alternativas através de um conjunto de normas e princípios. A escolha é feita de acordo com o grau de concordância ou discordância das alternativas com o conjunto de normas;
- A metodologia MAUT - *Multi Attribute Utility Theory* que tem como base a teoria da utilidade, que prevê a mensuração da satisfação por determinado bem ou serviço. Assim, esta metodologia tem capacidade de trabalhar com incertezas (probabilidade), cuja origem está na imprecisão dos dados. A aplicação parte da pontuação das alternativas através de critérios ou atributos, que por sua vez possuem pesos diferentes. Os pesos são estabelecidos de forma arbitrária, conforme a preferência;
- A metodologia PROMETHEE - *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*, tem o objetivo de tornar mais clara a interpretação de parâmetros físicos e econômicos. Partindo de uma comparação critério a critério entre todas as alternativas, esta metodologia permite posicionar cada alternativa de acordo com a ascendência de uma sobre a outra;
- A metodologia TOPSIS - *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Situation* utiliza para a escolha de alternativas as respectivas distâncias para uma solução ideal. As distâncias são expressas a partir da pontuação de cada alternativa em relação à solução ótima, ou seja, que tenha pontuação máxima. A análise por distância tem ainda como resultado a preponderância de uma alternativa em relação à outra.

O detalhamento das metodologias multicritério apresentadas foi abordado por Munier (2011). O trabalho traz ainda as aplicações e a explicação teórica de cada uma,

ressaltando que não é possível afirmar que uma metodologia é melhor que outra, mas que o melhor funcionamento depende da aplicação.

O método desenvolvido pelo Electric Power Research Institute ó EPRI (2006), este instituto norte americano elaborou uma metodologia baseada em análise multicritério, cuja seleção dos critérios e a respectiva participação de cada um destes na definição do traçado é determinada por um conjunto de profissionais que são relacionados à variável ou ao conjunto de variáveis que determinam onde o empreendimento deve passar.

A ponderação destas variáveis tem como base a inserção de uma escala de preferência ou impacto, positivo ou negativo, para cada variável. O modelo de ponderação das variáveis, tanto utilizado pelo EPRI (2006) quanto o descrito por Saaty (1980), propõe uma organização hierárquica para as comparações entre as variáveis através de cenários. O modelo é denominado Analytical Hierarchy Process (AHP) e, embora tenha sido desenvolvido para auxiliar decisões econômicas, tem sido amplamente difundido e aplicado nas mais diversas áreas da engenharia por ser um processo robusto, confiável e de fácil implementação.

No modelo AHP, os pesos nas variáveis não são atribuídos diretamente, mas sim através de parâmetros de preferência. A parametrização das variáveis tem como base a inserção de uma escala de preferência ou impacto, positivo ou negativo, para cada variável, sendo 1 menor preferência e 9 maior preferência. Esta escala é preenchida por cada profissional e cada envolvido no desenvolvimento do projeto. Depois cada variável é comparada par a par através do Analytical Hierarchy Process (AHP), que identifica e soluciona problemas de conflitos entre as áreas envolvidas no projeto, como exemplo a dificuldade de viabilizar a otimização de recursos disponíveis, ao mesmo tempo em que se pretende minimizar os impactos ambientais (NOBREGA, 2009).

2.4 Análise Multicriterial no Planejamento de Linhas de Transmissão

Basicamente são três etapas, propostas pelo EPRI (2006), de consultas realizadas para proposição da rota mais viável para o projeto. A primeira etapa visa propor um macro corredor preferencial para linhas, utilizando das variáveis: rodovias,

declividade (representando o relevo), uso e cobertura do solo e linhas de transmissão de energia já existentes. A segunda consulta propõe corredores alternativos a partir do macro corredor encontrado e utilizam as variáveis separadas em quatro grupos: variáveis do ambiente antrópico, como proximidade a prédios, densidade de prédios, estrutura fundiária; variáveis do ambiente natural, como áreas alagadas, áreas de mata, parques e áreas de conservação; variáveis técnicas, como linhas existentes, rodovias, gasodutos e relevo; e áreas evitáveis, como cemitérios, sítios arqueológicos, aeroportos e áreas militares. Já a terceira e última etapa faz a viabilidade econômica, levantando o custo de cada alternativa encontrada e também faz um refino das alternativas com variáveis como proximidade a edificações industriais ou comerciais. O trabalho apresentado por Schmidt (2009) utiliza metodologia muito parecida com a proposta pelo EPRI (2006), variando na seleção de algumas variáveis.

Outra fonte importante para compreensão da fase de planejamento são os Estudos de Impacto Ambiental das Linhas de Transmissão - EIA. Em análise aos relatórios referentes aos empreendimentos Joinville Norte - Curitiba, Oriximiná - Cariri, Cuiabá ó Ribeirãozinho - Rio Verde Norte, Coletora Porto Velho - Araraquara, com tensão nominal entre 230 kV e 600 kV, presentes nas regiões Norte, Centro Oeste, Sudoeste e Sul, que estão disponíveis no órgão concessor das licenças ambientais, o IBAMA, foi verificado que a metodologia indicada para os processos construtivos de implantação, as soluções de engenharia e a configuração final da estrutura dos empreendimentos são muito parecidas. Bem como existe uma semelhança nos critérios analisados para definição dos fatores de impacto e na metodologia utilizada para esta definição.

No EIA da LT Oriximiná ó Cariri, 230 kV (2009), as alternativas são comparadas através de fatores como: o número de travessias com cursos d'água e rodovias, proximidade a vias de acesso, métodos construtivos, interferência com ocupações urbanas ou áreas de ocupação especial, interferência com propriedades e benfeitorias, unidades de conservação, supressão de vegetação, interferência com a paisagem, atividade minerária, viabilidade técnico-econômica, interferência com comunidades tradicionais. As variáveis consideradas mudam de estudo para estudo, mas a metodologia de comparação não. São atribuídos valores a cada variável e tabulados para cada alternativa, conforme quadro exemplo apresentado na Figura 1.

Parâmetro	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Número de Travessias de cursos d'Água	58	67	58
Necessidade de Abertura de Acessos	Alta	Baixa	Baixa
Métodos Construtivos e Obras Especiais	Média		
Interferência com a Ocupação Urbana	Indução (Alta)	Limitação (média)	Limitação (Baixa)
Densidade Demográfica e Base Econômica	Densidade Média, Base Agrícola e Industrial		
Assentamentos, Conflitos Agrários	Não identificados		
Interferências com Propriedades e Benfeitorias	Alta	Média	Baixa
Número Estimado de Famílias a Serem Realocadas	Informação ainda não levantada, devendo ser apresentada no documento de Solicitação da Licença de Instalação		
UCs	2 UCs atravessadas, 10 UCs a menos de 10km, nenhuma comunidade tradicional ou TI atravessada	2 UCs atravessadas, 10 UCs a menos de 10km, uma aldeia indígena atravessada, mas nenhuma TI (consolidada)	2 UCs atravessadas, 10 UCs a menos de 10km nenhuma comunidade tradicional ou TI atravessada
Tipologia Vegetação	Quadro 3.5-7		
Supressão (ha)	117,76	123,58	122,92
Interferência com a Paisagem	Média (237 Torres)	Média (243 Torres)	Média (243 Torres)
Atividade Minerária	Quadro 3.5-8		
Viabilidade Técnico-econômica	Baixa	Média	Alta
Comunidades Tradicionais Atravessadas	0	1	0

Figura 1: Quadro de comparação entre alternativas, LT Oriximiná ó Cariri, 203 kV. (EIA, 2009)

Sobrepesando-se a discussão acerca das variáveis, com a pontuação e classificação respectiva a cada uma das informações elencadas, é elaborada uma conclusão com a indicação de uma alternativa e ressalvas. O caso exposto no quadro anterior definiu a alternativa 3 como a mais viável, salientando que, mesmo sendo ambientalmente causadora de interferências, esta alternativa tem maior viabilidade técnica que a alternativa 1 e não impacta uma aldeia indígena como a alternativa 2.

Após definida a alternativa, considerando os quadros de ponderação de fatores, é realizado um estudo altamente detalhado das características socioambientais, sendo estabelecido um índice de sensibilidade ambiental para a área de interferência do empreendimento. Este índice é definido através do cruzamento de várias informações sobre o meio físico, meio biótico e meio socioeconômico. São definidos, portanto, os possíveis impactos ambientais e econômicos através de um mapa que indica o índice de sensibilidade ambiental da alternativa escolhida.

Entretanto, o índice não é utilizado na escolha das alternativas de rota das citadas Linhas de Transmissão. Dessa forma, é possível que existam alternativas mais viáveis para o empreendimento, pois os impactos ambientais, sociais e econômicos só foram analisados de forma detalhada após o traçado já definido. A indicação de medidas mitigatórias e os programas ambientais também só são consolidados após a definição do traçado.

O setor de infraestrutura em energia investe muito no desenvolvimento de melhores tecnologias e sistemas para elaboração e execução destes projetos, são vários os estudos de Pesquisa e Desenvolvimento ó P&D, patrocinados por empresas consolidadas do setor. Um desses projetos de P&D foi elaborado para a otimização de rotas para linhas de transporte de energia, o software Rota (BELÉM et al, 2009) foi desenvolvido. O programa faz uma sobreposição de imagens *rasters* de parâmetros da paisagem, com custos associados a cada classe de variável inserida. Estes custos são representados por pesos que devem ser atribuídos pelo usuário aos parâmetros da paisagem.

2.5 Proposta de Modelagem Espacial para Linhas de Distribuição Utilizando Padrões Espaciais

Estabelecido que as linhas de transporte aéreo de energia elétrica tem interação direta com o ecossistema onde serão inseridas, tem-se a possibilidade de representar esta paisagem em um ambiente controlado, através de uma visão sistêmica e dinâmica, cujas forças e variáveis são representadas por fluxos de energia que interagem entre si. O estudo sistêmico sobre a dinâmica da paisagem requer metodologias que possibilitem que o conhecimento fragmentado sobre as partes, ou seja, das diversas especialidades científicas, possam ser sintetizados em modelos análogos abstratos de representação do real, cuja funcionalidade atende à necessidade do planejamento, para entender e prever o impacto socioambiental de suas ações de interferência e a possibilidade de promover a eficiência no uso dos recursos (CHRISTOFOLETTI, 1998).

Ainda, de acordo com Chistofoletti (1998), a representação em um ambiente controlado do sistema de forças e energias que interagem entre si pode fornecer

parâmetros para variáveis que explicam ou que determinam o funcionamento de determinado fenômeno, como por exemplo, a existência de um acontecimento num lugar específico, ou seja, que obedeça a um padrão espacial.

O estudo sobre a identificação de padrões espaciais tem larga aplicação em pesquisas sobre mudança de uso e cobertura do solo, conforme Soares-Filho (1998) e Almeida (2003), como também na identificação de padrões para localização de fenômenos, conforme Bonham-Carter (1994) e Nunes (2010). Portanto, se a existência de linhas de energia for considerada um fenômeno que ocorre na paisagem, e que é determinado por variáveis mensuráveis, é possível que os traçados das linhas de transmissão de energia obedeçam a padrões espaciais. Uma vez que estes empreendimentos obedecem a um padrão espacial é possível determinar quais são as variáveis presentes na paisagem que melhor explicam a ocorrência do fenômeno.

Para identificação do padrão espacial foi utilizada a metodologia adotada por Almeida (2003) e Bonham-Carter (1994). Ambos têm como base o Teorema de Bayes ou também denominado Teorema da Probabilidade Condicional, cuja aplicação fornece a probabilidade de ocorrer um fenômeno, no caso a existência de linhas de energia (Z), dado a ocorrência de um conjunto de variáveis explicativas e relacionadas ao fenômeno ($B \cap C \cap \dots \cap N$), conforme a equação 1:

$$P(Z|B \cap C \dots \cap N) = P(Z) \frac{P(B \cap C \dots \cap N|Z)}{P(B \cap C \dots \cap N)} \quad (1)$$

A equação 1 encontra a probabilidade de ocorrência, mas para saber se há um padrão espacial é necessária a verificação do comportamento das variáveis onde não ocorre Z (Z'), conforme a equação 2:

$$P(Z'|B \cap C \dots \cap N) = P(Z') \frac{P(B \cap C \dots \cap N|Z')}{P(B \cap C \dots \cap N)} = 1 - P(Z|B \cap C \dots \cap N) \quad (2)$$

A definição da presença ou ausência de linha de energia estabelece uma variável dependente binária, com comportamento de uma função logística quando variada por um conjunto de variáveis explicativas. Como uma função logística tem características não lineares de regressão, há a necessidade da linearização dessa função para que seja

possível determinar a capacidade ou qual a participação de cada variável explicativa na presença ou ausência da variável dependente (MENDES, 2004). A linearização da função ocorre, de uma forma simplista, quando o intervalo de variação da variável dependente deixa de ser binário, ou seja, variar entre 0 e 1. A divisão da probabilidade de $P(Z|B \text{ C } \dots \text{ N})$ por $P(Z'|B \text{ C } \dots \text{ N})$ fornece a chance de ocorrência da variável dependente, este conceito é denominado Odds (O) e tende ao \hat{O} quando a probabilidade de Z tende a 1 (Equação 3).

$$O = \frac{P(Z|B \text{ C } \dots \text{ N})}{1 - P(Z|B \text{ C } \dots \text{ N})} \quad (3)$$

Dessa forma, o intervalo de variação passa a ser $0 < P(Z|B \text{ C } \dots \text{ N}) < \hat{O}$ e para eliminar o limite inferior utiliza-se uma transformação logit (*logistic probability unit*) da Odds, conforme equação 4:

$$\text{Logit } O = \ln_e \left[\frac{P(Z|B \text{ C } \dots \text{ N})}{1 - P(Z|B \text{ C } \dots \text{ N})} \right] = W_N^+ \quad (4)$$

Onde W_N^+ representa o coeficiente do peso de evidência, este termo assume a característica de atribuir um peso de explicação para cada variável independente, onde quanto maior o valor de W_N^+ mais associada é a ocorrência de Z com variável em análise. Quando todas as variáveis são analisadas em conjunto, atribuindo-se a cada uma seu respectivo coeficiente, encontramos o peso de evidência, ou seja, a probabilidade de ocorrência de Z dado a ocorrência do conjunto (B C ... N) de variáveis medidas na paisagem. Para tanto, convertamos o logit de O novamente para probabilidade e substituamos na equação 1, conforme as equações 5 e 6:

$$\frac{P(Z|B \text{ C } \dots \text{ N})}{1 - P(Z|B \text{ C } \dots \text{ N})} = e^{\sum W_N^+} \quad (5)$$

Simplificando para a equação 1:

$$P(Z|B \text{ C } \dots \text{ N}) = \frac{e^{\sum W_N^+}}{1 + e^{\sum W_N^+}} \quad (6)$$

Portanto, a determinação dos locais de maior preferência à implantação de empreendimentos de transporte de energia é expressa em probabilidade. Esta probabilidade é encontrada através de uma regressão, cujas variáveis explicativas estão presentes de forma mensurável na paisagem.

A determinação destas variáveis parte da análise de projetos já implementados, cujo aperfeiçoamento das técnicas de planejamento, incluindo a fase de locação do empreendimento, acompanha toda a evolução do setor elétrico e são inegáveis os avanços já alcançados por empresas consolidadas neste setor. A utilização da experiência, adquirida ao longo de tantos anos de pesquisa e desenvolvimento destas técnicas, reforça a possibilidade de se encontrar soluções que viabilizem o menor custo com o menor impacto. Tendo a forma atual de locação do traçado como ponto de partida é possível prever alternativas de traçado com a inserção de variáveis ou com atribuição de maior peso as variáveis que otimizem a proposta deste estudo.

Estas alternativas de traçado podem ser definidas utilizando-se os métodos multicritérios. A utilização dessa metodologia possibilita a combinação de vários critérios, atribuindo-se um valor a cada variável de acordo com a sua capacidade explicativa, sendo que o valor deve ser apresentado em unidade comparável entre todas as variáveis (SADASIVUNI et al, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A solução encontrada para resolução do problema levantado foi a elaboração de um modelo espacialmente explícito e multitemporal, visando encontrar a probabilidade de ocorrência de linha de transmissão de energia dado um conjunto de variáveis explicativas. O modelo é considerado multitemporal, pois utiliza um intervalo de tempo de 25 anos, para o qual a paisagem analisada apresenta várias linhas de transmissão. As linhas e seus respectivos entornos, classificados de acordo com o período de construção, são analisados para a extração de padrões espaciais. O padrão espacial expresso em probabilidade, após a validação do modelo, será utilizado para traçar rotas para linhas de transporte de energia, cuja otimização ocorrerá com a inserção de variáveis que restrinjam o traçado. O modelo foi elaborado nas plataformas do Dinâmica Ego e do ArcGis.

A metodologia foi dividida em quatro partes principais, sendo cada uma dependente da etapa anterior. A primeira parte consiste em realizar para cada período de tempo a categorização em classes das variáveis contínuas, a definição dos pesos de evidência e os mapas preliminares de probabilidade de ocorrência de linhas de transmissão de energia. A segunda etapa tem por objetivo a calibração dos pesos de evidência e o recálculo dos mapas de probabilidade. A terceira parte é a validação do modelo, na qual será traçada uma linha, para validação com uma já existente, a partir do mapa de probabilidade de ocorrência de linha de transmissão. A quarta e última parte insere variáveis consideradas não observáveis na paisagem e que tem o caráter de otimizar o traçado. O fluxo representado na Figura 2 delimita e exemplifica de forma mais adequada o que será detalhado neste capítulo:

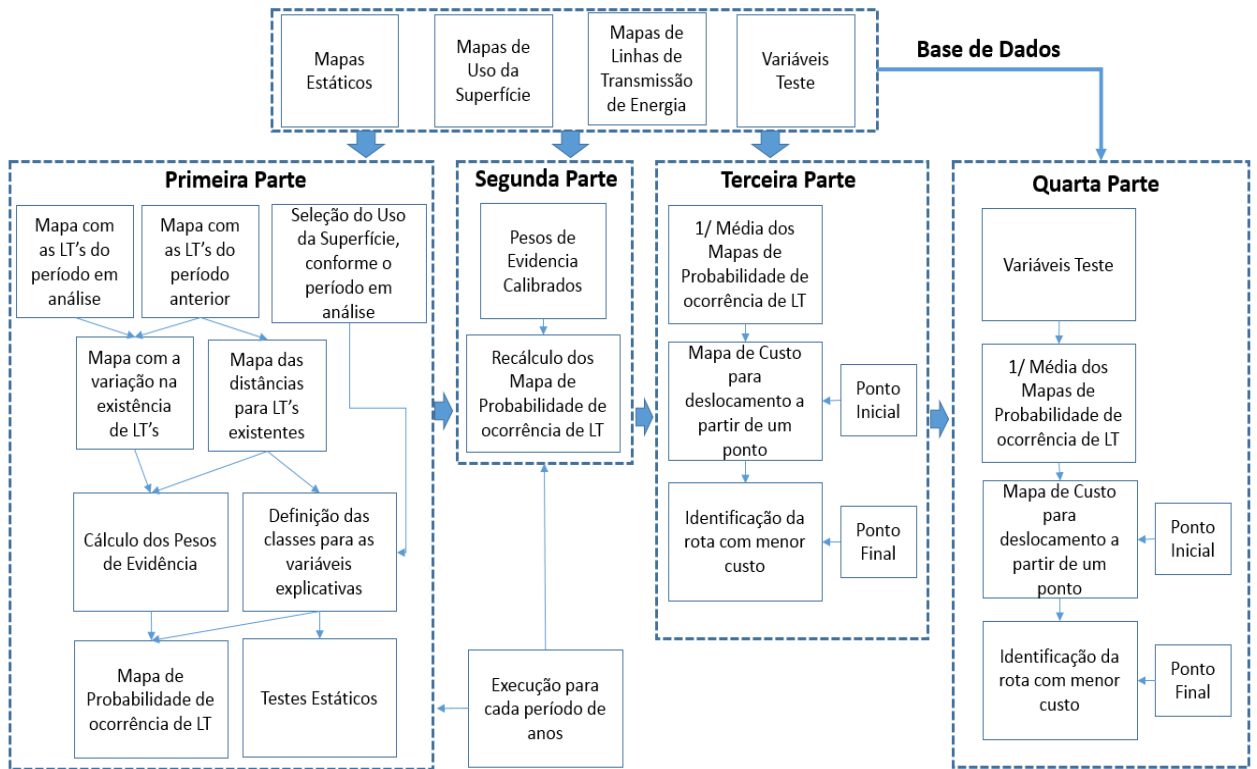


Figura 2: Esquema de Funcionamento do Modelo

3.1 Base de Dados

A representação da paisagem considerou as variáveis que têm maior capacidade explicativa para a ocorrência de linhas de energia. Para tanto, foi considerada a norma técnica de especificação de obras desse tipo de empreendimento (NBR 5.422, 1985), a tratativa teórica para projetos de linhas de transmissão de energia oferecida por Labegaliniet al (1992), bem como as pesquisas desenvolvidas no estudo corredores ótimos para locação das linhas (EPRI, 2006; SCHMIDT, 2009)

Nesta pesquisa buscou-se identificar padrões espaciais na locação de linhas de transmissão para o que o EPRI (2006) denomina como macro corredor preferencial para linhas de energia. Algumas variáveis necessárias para construção de linhas de energia não estão presentes na paisagem, como o material a ser utilizado na construção, assim como outras variáveis são derivações de variáveis mais gerais, por exemplo, proximidade ou densidade de ambientes antrópicos. Já variáveis como condição de fundação e algumas áreas evitáveis, por exemplo, a existência de áreas demarcadas apenas através de documentos, não são observáveis pelo profissional quando do planejamento do macro corredor.

Dessa forma, optou-se pela utilização das variáveis: distância a rodovias, distância a linhas existentes, distância a principais rios e cursos de água, uso e cobertura do solo e declividade do terreno. Compreendem-se estas como o conjunto de variáveis explicativas à preferência pela ocorrência de linhas de transporte de energia.

Já para a proposição de alternativas, quanto ao traçado baseado no padrão espacial das linhas existentes, foram consideradas variáveis não identificáveis na observação da paisagem no momento do planejamento, como áreas de restrição ambiental, concessão de lavras minerárias e assentamentos rurais. Todas as variáveis estão relacionadas no tabela 1:

Tabela 1: Descrição das Variáveis Utilizadas no Modelo

Estáticas		
Variável	Tipo	Unidade
Distância a Rios	Continua	metros
Distância a Rodovias	Continua	metros
Declividade	Continua	graus
Variáveis		
Variável	Tipo	Unidade
Distância a Linhas Existentes	Continua	metros
Uso e Ocupação do Solo	Catagórica	1; 2; 3; 4; 5
Teste		
Variável	Tipo	Unidade
Concessões de Lavra	Binária	0; 1
Áreas de Preservação Ambiental	Binária	0; 1
Assentamentos Rurais	Binária	0; 1

Todas as variáveis foram convertidas para a forma matricial de representação, onde cada célula da matriz tem 60x60 metros, com o mesmo registro geográfico. Foi utilizada esta resolução visto as que são das imagens utilizadas para classificação do uso e ocupação do solo, bem como foi utilizado o registro geográfico, o sistema de coordenadas e o DATUM destas imagens. O uso e ocupação do solo foram extraídos da classificação de imagens Landsat 1, 5 e 7, nos anos de 1975, 1984, 1990 e 2000, visto a disponibilidade de imagens que melhor dividissem o tempo abrangido de análise e com menor cobertura de nuvens. O uso e ocupação da superfície foi classificado em cinco classes, sendo estas urbano, silvicultura, vegetação nativa, corpos de água e

agropecuária. Foi utilizada a metodologia de classificação supervisionada do *software* Envi.

Assim, as linhas existentes foram divididas em cinco categorias, conforme o ano de entrada em operação. A primeira classe é das linhas construídas antes de 1975 e as demais classes estão nos intervalos de classificação do uso e cobertura do solo. As demais variáveis foram consideradas estáticas no modelo, ou seja, não possuem variação no tempo.

3.2 Área de Estudo

O modelo foi aplicado na região do Triângulo Mineiro em Minas Gerais e parte do estado de Goiás. Os municípios abrangidos pela pesquisa foram Uberlândia, Araguari, Uberaba, Ituiutaba e Itumbiara, cobrindo uma área de 21.650 km², ilustrada na Figura 3. As linhas de transmissão de energia pesquisadas são de responsabilidade da Cemig Distribuição S/A e Cemig Transmissão S/A, cujas tensões nominais variam entre 69kV e 500kV. A maioria das linhas de energia tem estruturas metálicas de suporte ao cabeamento e faixas de segurança a partir do eixo central entre 23 metros e 40 metros.

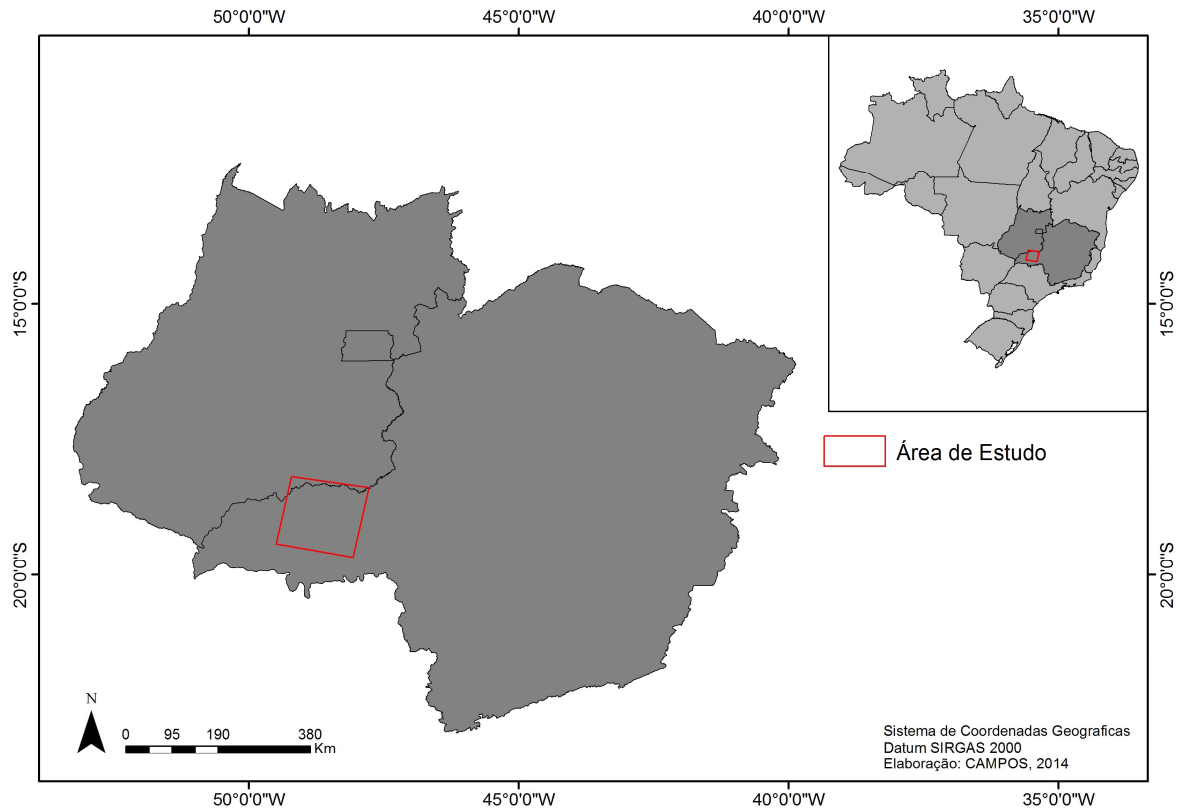


Figura 3: Mapa de Localização da Área de Estudo

3.3 Primeira Parte: Preparação dos Dados

O modelo tem uma interação para cada categoria criada. São consideradas em cada interação as linhas que já existiam no período anterior ao que está em análise, mais as linhas que foram construídas no período em questão, sendo, dessa forma, analisada qual foi a variação do fenômeno, ocorrência de linhas, na paisagem. Assim, o modelo tem a capacidade de verificar quais as características de onde já existiam linhas e quais são características de onde foram construídas novas linhas, analisando se há algum padrão espacial nessa variação. Para cada interação o modelo calcula a distância euclidiana para as linhas já existentes e seleciona qual o uso e ocupação da superfície referente ao período considerado na interação.

Para identificação do padrão espacial é necessário a categorização das variáveis contínuas. A divisão de classes utiliza a metodologia aplicada por Agterberg e Bonham-Carter (1990) e adaptada por Soares-Filho (2008) na plataforma do Dinâmica Ego. Esta metodologia propõe a divisão de intervalos a partir da comparação entre a ocorrência da variação com cada intervalo. Assim, os intervalos demarcam a frequência da ocorrência

da variação. Com todas as variáveis categorizadas é possível o cálculo dos coeficientes para cada variável explicativa, ou seja, os Pesos de Evidência.

Após encontrar a equação que explica a probabilidade de ocorrência de linhas de transmissão de energia, foram realizados dois testes estatísticos para verificar a dependência entre as variáveis explicativas: o cálculo do Coeficiente de Cramer e o Joint Information Uncertainty (BONHAM CARTER, 1994). Nos testes, as variáveis são comparadas par a par e os valores são apresentados para cada comparação. Quanto menor os valores encontrados menor é a dependência entre as variáveis, Bonham Carter (1994) sugere o limite de 0,5 para as duas análises.

Por fim, os mapas de probabilidade são gerados, um para cada interação do modelo, considerando a equação de regressão logística produto do cálculo dos pesos de evidência.

3.4 Segunda Parte: Calibração e Recálculo do Modelo

A segunda parte consiste na calibração do modelo e recálculo dos mapas de probabilidade. A calibração é a análise e ajuste dos pesos de evidência, garantindo que a função de variação dos coeficientes em relação à alteração de cada variável tivesse uma correlação. Os coeficientes que não descreviam nenhuma função ou apresentavam baixa correlação com as variáveis foram desconsiderados, conforme o exemplo da figura 4:

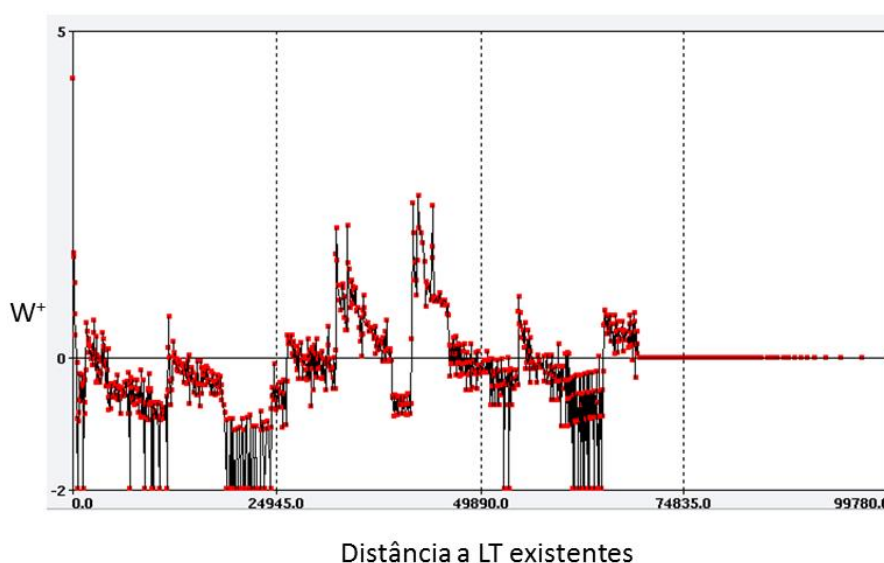


Figura 4: Gráfico da Função de W^+ em relação à distância de LT existentes

No caso da Figura 4 estão consideradas todas as classes de distância às linhas de energia existentes, criadas a cada 60 metros, partindo de 0 a 100 km. Não há uma função bem descrita, pois após uma distância esta variável perde a capacidade explicativa. Já na Figura 5, há uma função de variação para distâncias até 3 km, onde quanto mais próximo à linha, maior é a preferência a ocorrência da variável dependente.

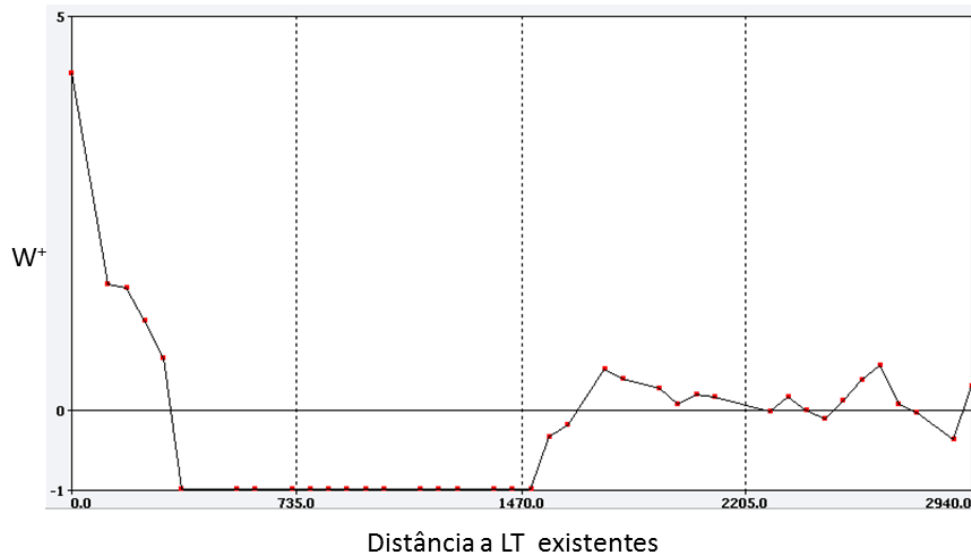


Figura 5: Gráfico da Função ajustada de W+ em relação à distância de LT existentes

Com os pesos de evidência calibrados novos mapas de probabilidade são gerados e considerados na terceira parte do modelo.

3.5 Terceira Parte: Validação do Modelo

Esta etapa do modelo é a que traça a rota com menor custo de deslocamento, considerando como custo o inverso da probabilidade de ocorrência de linhas de transmissão de energia. Portanto, esta etapa foi utilizada também como validação do modelo, uma vez que para o cálculo dos pesos de evidência uma das linhas existentes não foi considerada. Dessa forma, é possível verificar a aderência da linha proposta pelo modelo com a linha de fato existente.

Para traçar a rota o modelo considera a metodologia também utilizada por Soares-Filho et al (2009), que prevê o cálculo de um mapa de custo para sair de qualquer ponto do mapa para um ponto específico, em outras palavras é um mapa de

custo acumulado para um ponto ou local especificado. O mapa de custo leva em consideração o mapa de probabilidade, que por sua vez foi composto a partir dos quatro mapas de probabilidade gerados. Esta composição é a média de tendência para os quatro mapas iniciais, pois assim é possível amortizar coeficientes tendenciosos.

Para o cálculo do mapa de custo foi utilizado o inverso do mapa de probabilidade, uma vez que o maior valor no segundo mapa indica maior probabilidade. Indicado o menor custo acumulado a partir do ponto inicial da linha de transporte de energia elétrica é necessário calcular a rota com menor custo até o ponto final desta linha. Para tanto foi utilizado o algoritmo denominado *Least Costly Path*, que opera a partir da conexão dos pixels com o menor valor do mapa de custo a uma menor distância possível. Como o pixel tem uma dimensão de 60 por 60 metros, o algoritmo encontra um corredor provável com 60 metros de largura com maior probabilidade de existência de uma linha de transmissão.

3.6 Quarta Parte: Análise Multicritério

A execução desta etapa pressupõe que o modelo seja validado para ser passível de predizer rotas ainda não existentes. Esta capacidade de predição significa que o modelo tem a capacidade de indicar um corredor preferencial para existência de uma linha de transporte de energia. Entretanto, a indicação deste corredor tem por subsídio a experiência acumulada do modo, até então, preferencial de se projetar e construir linhas de transmissão de energia. Portanto, a indicação de um corredor ótimo implica na possibilidade de serem consideradas variáveis que aproximem o projeto do ideal de minimizar custo e impactos.

Para tanto, foram selecionadas variáveis que têm impacto direto nas questões ambientais, socioeconômicas e de custo para o projeto, cuja apreensão na paisagem não ocorre da mesma forma que as utilizadas nas etapas anteriores. As variáveis Unidades de Conservação, Assentamentos Rurais e Concessões de Lavras Minerárias estão apresentadas respectivamente as questões de interferência descritas.

Estas variáveis, denominadas de variáveis de teste, foram classificadas de forma binária, pois representam áreas a serem evitadas no projeto de uma linha de transporte

de energia. Dessa forma, as variáveis teste foram acrescentadas ao mapa de probabilidade com o valor 1, assim, quando o mapa de probabilidade for convertido para o mapa de custo, que tem variação de 0 a 1, estas áreas serão evitadas. Ressalta-se que esta metodologia possibilita que as variáveis teste recebam valores diferentes de impedância, que podem, conseqüentemente variar entre 0 e 1, sendo 1 maior impedância e 0 menor.

A inserção das variáveis de teste dá ao modelo a possibilidade de junção de critérios diferentes com o objetivo de otimização do empreendimento, em outras palavras, uma análise multicritério. Se apenas o mapa de probabilidade for considerado como variável, que representa o padrão de construção preferencial de linhas de transmissão de energia, não há o que se falar em análise multicritério, pois, conforme Nobrega (2009), este tipo de análise tem o intuito de possibilitar a resolução da melhor alternativa a partir de critérios que resultam de diferentes pontos de vista e interesses sobre a mesma questão, no caso a construção de um empreendimento de transporte de energia.

Com o novo mapa de probabilidade é novamente executado o procedimento da terceira etapa do modelo, tópico anterior a este. Para efeito de teste foram comparadas rotas traçadas sem e com as variáveis de teste. Os resultados estão descritos no próximo capítulo.

4 RESULTADOS

Cada etapa de execução do modelo gera resultados a serem discutidos. A primeira parte do modelo apresenta os testes estáticos de Cramer e o Joint Information Uncertainty (BONHAM CARTER, 1994) para verificar a existência de dependência entre as variáveis na explicação da variável dependente. As tabelas de 2 a 6 demonstram que em todas as interações do modelo as variáveis independentes foram aceitas com o limiar de 0,5 para ambos os teste. Caso fosse identificada a dependência entre quaisquer variáveis significaria que ambas estão explicando ou ocasionando o mesmo resultado. O fato das variáveis serem independentes demonstra que a todas têm a capacidade de explicar a probabilidade de existência de linhas de energia.

Tabela 2: Testes Estatísticos para o período entre antes de 1975 a 1975

Variável 1	Variável 2	Cramer	Joint Uncertainty
Distância a LT's Existentes	Distância a Rios	0,062	0,036
Distância a LT's Existentes	Distância a Rodovias	0,133	0,100
Distância a LT's Existentes	Declividade	0,074	0,007
Distância a LT's Existentes	Uso do Solo	0,097	0,007
Distância a Rios	Distância a Rodovias	0,065	0,024
Distância a Rios	Declividade	0,063	0,005
Distância a Rios	Uso do Solo	0,100	0,006
Distância a Rodovias	Declividade	0,061	0,004
Distância a Rodovias	Uso do Solo	0,087	0,006
Declividade	Uso do Solo	0,057	0,004

Tabela 3: Testes Estatísticos para o período entre 1975 e 1984

Variável 1	Variável 2	Cramer	Joint Uncertainty
Distância a LT's Existentes	Distância a Rios	0,113	0,037
Distância a LT's Existentes	Distância a Rodovias	0,183	0,068
Distância a LT's Existentes	Declividade	0,057	0,005
Distância a LT's Existentes	Uso do Solo	0,103	0,012
Distância a Rios	Distância a Rodovias	0,041	0,020
Distância a Rios	Declividade	0,058	0,004
Distância a Rios	Uso do Solo	0,134	0,014
Distância a Rodovias	Declividade	0,057	0,004
Distância a Rodovias	Uso do Solo	0,158	0,016
Declividade	Uso do Solo	0,050	0,004

Tabela 4: Testes Estatísticos para o período entre 1984 e 1990

Variável 1	Variável 2	Crammer	Joint Uncertainty
Distância a LT's Existentes	Distância a Rios	0,057	0,039
Distância a LT's Existentes	Distância a Rodovias	0,127	0,073
Distância a LT's Existentes	Declividade	0,038	0,005
Distância a LT's Existentes	Uso do Solo	0,114	0,012
Distância a Rios	Distância a Rodovias	0,060	0,020
Distância a Rios	Declividade	0,038	0,005
Distância a Rios	Uso do Solo	0,142	0,016
Distância a Rodovias	Declividade	0,039	0,005
Distância a Rodovias	Uso do Solo	0,164	0,020
Declividade	Uso do Solo	0,122	0,020

Tabela 5: Testes Estatísticos para o período entre 1990 e 2000

Variável 1	Variável 2	Crammer	Joint Uncertainty
Distância a LT's Existentes	Distância a Rios	0,055	0,016
Distância a LT's Existentes	Distância a Rodovias	0,149	0,082
Distância a LT's Existentes	Declividade	0,049	0,003
Distância a LT's Existentes	Uso do Solo	0,104	0,011
Distância a Rios	Distância a Rodovias	0,057	0,022
Distância a Rios	Declividade	0,058	0,005
Distância a Rios	Uso do Solo	0,147	0,018
Distância a Rodovias	Declividade	0,056	0,004
Distância a Rodovias	Uso do Solo	0,141	0,015
Declividade	Uso do Solo	0,130	0,023

A calibração existente na segunda parte do modelo excluí as classes das variáveis que não seguem a função existente entre W^+ (Pesos de Evidência) as classes, conforme os exemplos nas Figuras 4 e 5. Em outras palavras, esta calibração funciona como um filtro para as classes das variáveis contínuas sem correlação com os coeficientes da regressão. Este filtro tem um resultado importante ao reduzir os ruídos, os quais poderiam influenciar o resultado. A Figura 6 demonstra o resultado da calibração:

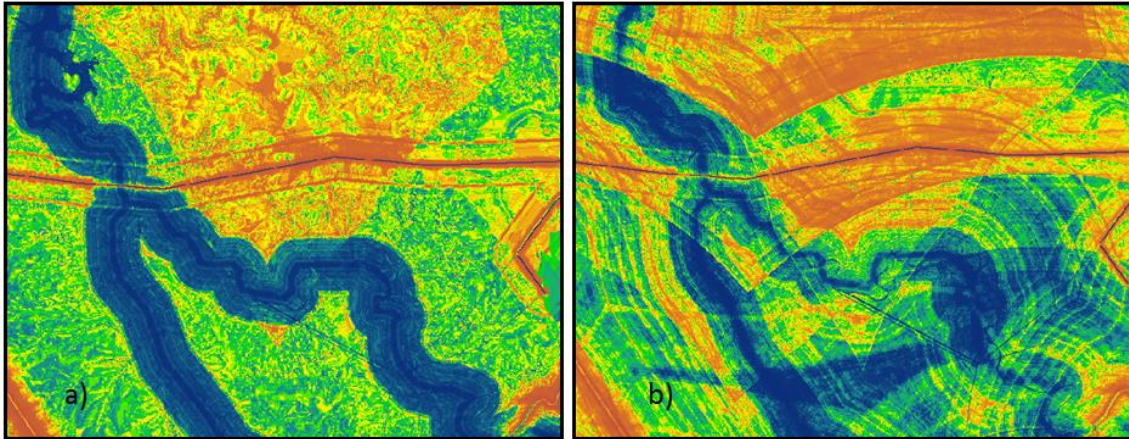


Figura 6: Amostragem da Calibração do Modelo. Figura a) após o filtro, figura b) sem o filtro

O resultado da calibração é o mapa de probabilidade média, que foi utilizado como superfície de custo, conforme a Figura 7:

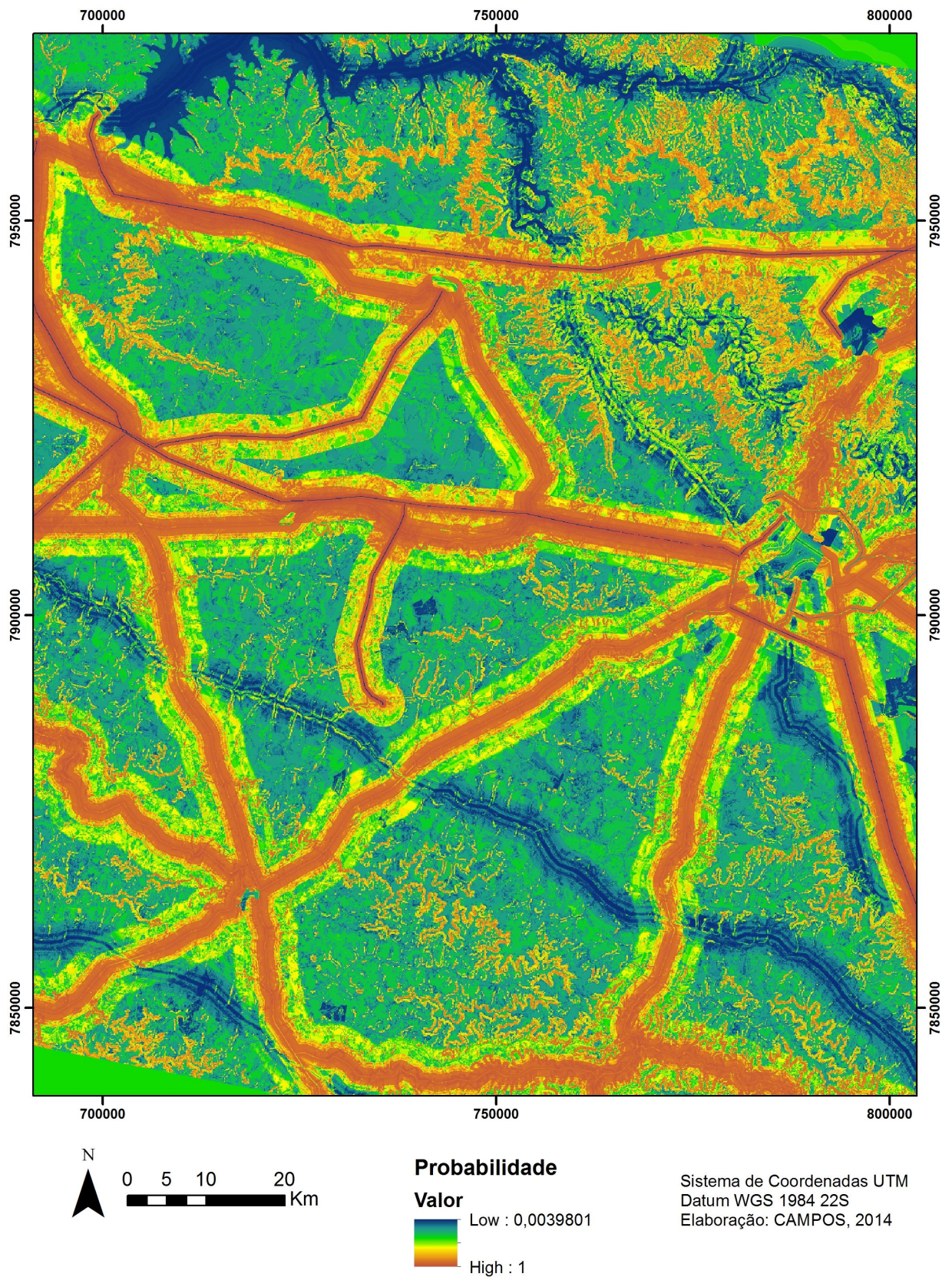
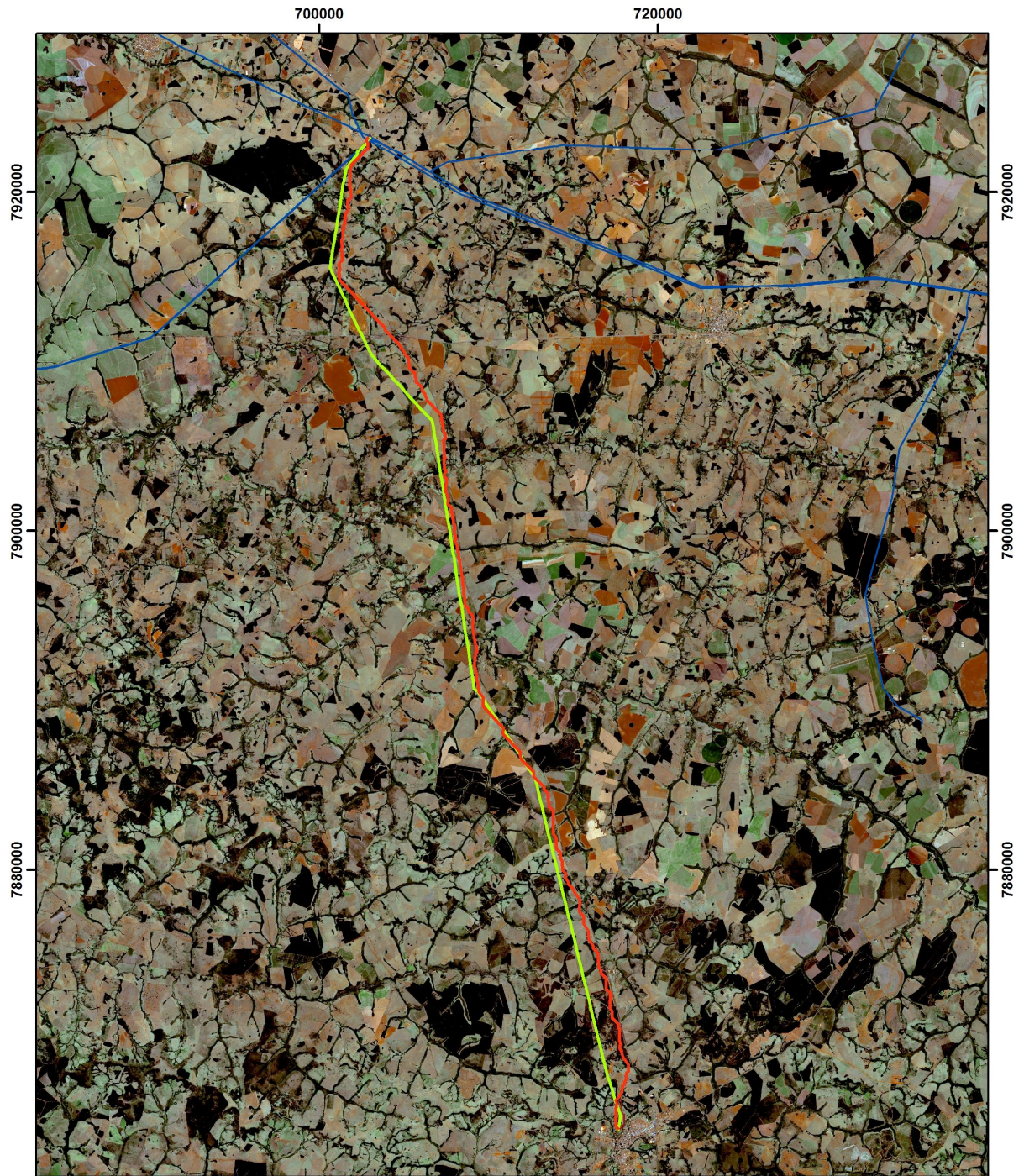


Figura 7: Mapa de Probabilidade Média

A legenda da Figura 7 mostra que as cores mais quentes são as com maior probabilidade de ocorrência de linhas de transporte de energia. Já, as cores mais frias têm menor probabilidade. A Figura 7 mostra ainda que a probabilidade é maior na proximidade com rodovias e algumas classes de declividade, enquanto que rios e uso urbano da superfície diminuem a probabilidade.

A validação do modelo considera a aderência de uma linha de transmissão de energia projetada pelo modelo a uma existente e não considerada na base de dados. A linha utilizada para a validação conecta as subestações de Avatinguara, no município de Canápolis, Minas Gerais, à subestação do município de Prata, Minas Gerais. É uma linha de 69 kV, construída em 2003, com aproximadamente 63,1 quilômetros de extensão e possui uma faixa de domínio de 23 metros de largura. A projetada pelo modelo traçou um corredor com 60 metros de largura numa extensão aproximada de 67 quilômetros, conforme a Figura 8.



Sistema de Coordenadas UTM
 Datum WGS 1984 22S
 Imagem: Lansat 8, bandas 4R3G2B, fusionada com
 banda Pancromatica
 Elaboração: CAMPOS, 2014

- LT Projetada pelo modelo
- LT's Existentes consideradas
- LT Existente não considerada

Figura 8: Resultado Validação do Modelo

A simples análise heurística de aderência da linha de transmissão de energia projetada à existente já demonstra a validade do modelo. Os traçados são praticamente coincidentes, com pequenas variações. A variação mais significativa está presente próxima ao cruzamento da BR 365 com a BR 153, conforme a Figura 9:

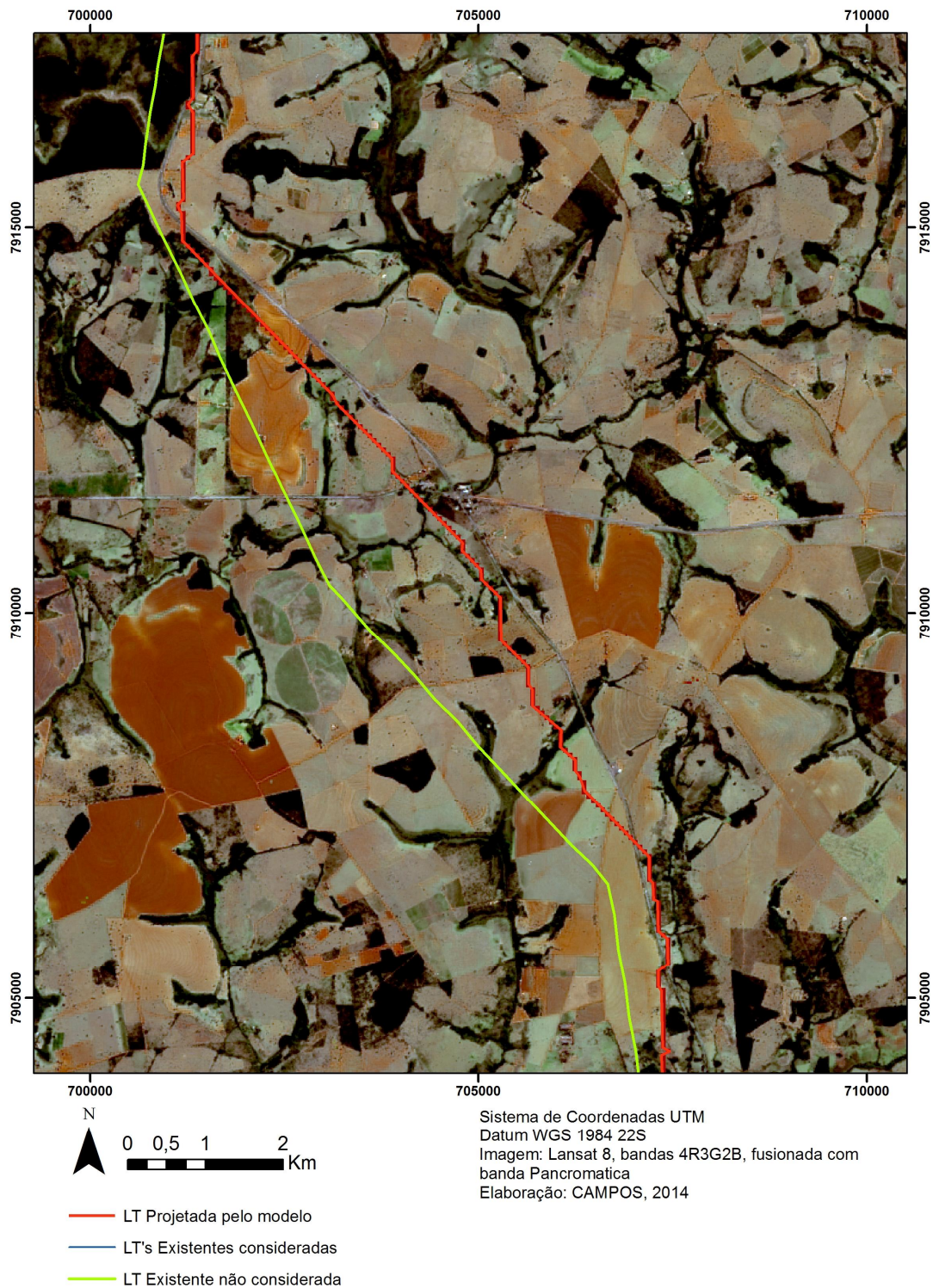


Figura 9: Detalhe da Validação do Modelo

Antes de ser uma falha do modelo, este desvio representa a possibilidade de identificar variáveis explicativas não consideradas no modelo. No caso, o desvio pode ser explicado pela existência do cruzamento entre as duas rodovias e, por mais explícito que seja a impedância do cruzamento, não consta em nenhuma das referências utilizadas a menção desta variável.

Após o modelo validado, outras rotas foram traçadas, contudo para linhas de transmissão de energia não existentes. Foram feitos mais três traçados, sendo o primeiro para testar o comportamento do modelo ao gerar uma linha não existente e interligando pontos já conectados por linhas de transporte de energia. Os outros dois traçados foram feitos para testar o desempenho das variáveis de teste, conforme a quarta parte do modelo descrita no capítulo anterior. Para entendimento os traçados serão denominados de 1, 2 e 3, respectivamente.

O traçado 1 interliga a subestação da Petrobrás, que fica no município de Uberlândia, à cidade de Monte Alegre de Minas em uma nova subestação. A distância linear entre os dois pontos de conexão é de aproximadamente 53 km, enquanto que o traçado projetado pelo modelo tem cerca de 62 km. O traçado projetado pelo modelo buscou a rota preferencial em paralelismo com linhas já existentes e desviou de áreas urbanas, quando consideradas na classificação. Apesar da diferença entre o traçado projetado e a distância linear entre os pontos de conexão, o projetado manteve os seus seguimentos retilíneos, conforme a Figura 10:

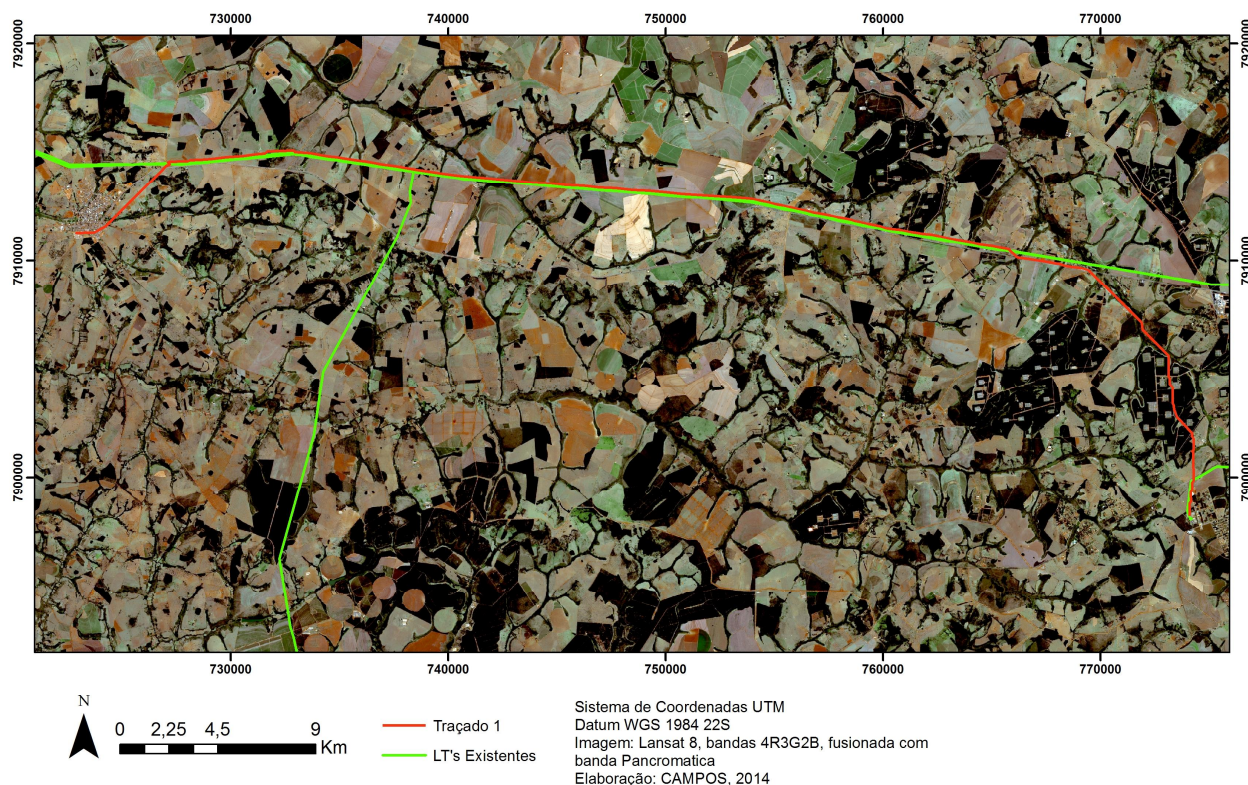


Figura 10: Traçado 1

O traçado 2 foi projetado desconsiderando as variáveis teste e interligando um local sem a existência de linhas de transmissão de energia. O resultado, conforme a Figura 11, é um traçado sem muitos desvios e com uma diferença pequena entre a distância linear dos pontos de conexão e a distância projetada, sendo a primeira aproximadamente 19 km e a segunda 21 km. Já o traçado 3 considerou as variáveis teste, no local apenas a variável Assentamentos Rurais era presente. Conforme a Figura 11, o traçado desviou do assentamento como se este fosse uma restrição à passagem da linha de transmissão de energia, após o desvio do assentamento o traçado 3 retomou a rota do traçado 2 para o mesmo ponto de conexão.

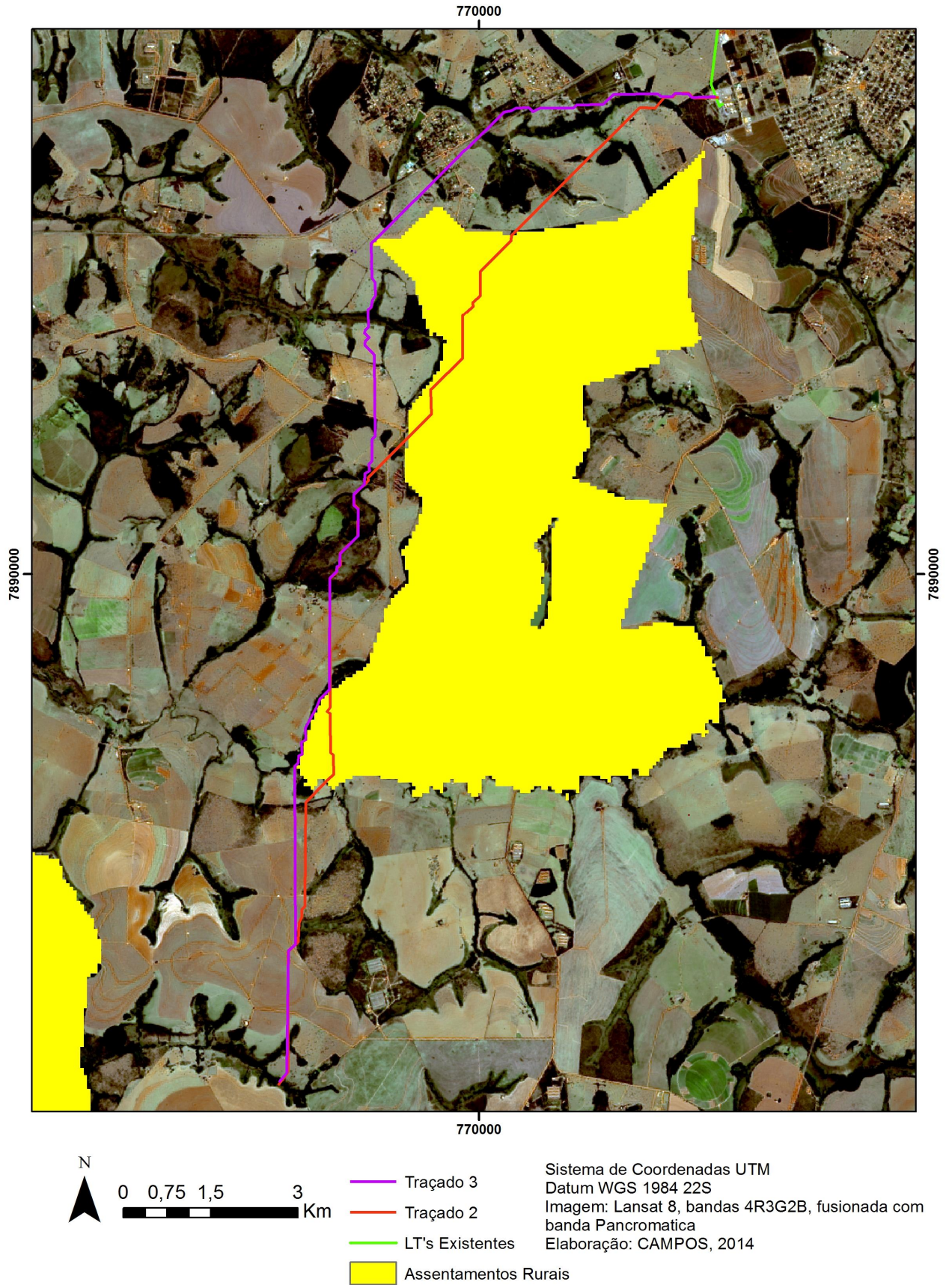


Figura 11: Comparação entre o Traçado 2 (desconsiderando as variáveis teste) e o Traçado 3 (considerando as variáveis teste)

O traçado 3 aumentou, com o desvio, um pouco mais de 1 km em relação ao traçado 2, entretanto o custo social e mesmo econômico de interferência de um empreendimento desse porte em um assentamento rural, cuja a divisão das propriedades é realizada em pequenas porções de terra, pode justificar tal desvio. No processo de criação da faixa de segurança, obrigatória a qualquer linha de transmissão de energia, é inerente o procedimento de desapropriação da propriedade para constituição de servidão administrativa, direito de passagem sem a aquisição plena da propriedade. No caso, se for considerado que a faixa de servidão tem 23 metros de largura, valor usual para o tipo de empreendimento, e que o traçado 2 impacta o assentamento em cerca de 4.200 metros de comprimento, o resultado será de aproximadamente 9,6 hectares de terra. Portanto, considerando que uma família assentada vive em uma propriedade de aproximados 20 hectares, visto o que o assentamento tem cerca de 4.500 hectares e 200 famílias (INCRA, 2014), esta linha de transmissão iria afetar parte considerável da propriedade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da modelagem espacial para a realização de projeções de novos empreendimentos de transporte de energia elétrica mostrou-se viável com o modelo proposto neste trabalho, assim como nos modelos já demonstrados pelos trabalhos do EPRI (2006), Schmidt (2009) e Belém et al (2009). A modelagem espacial demonstrou ainda a possibilidade de realizar análises imprescindíveis na paisagem, como também a oportunidade de obter elementos que auxiliam de forma determinante na viabilização de projetos indispensáveis à sociedade.

Entre estes elementos observáveis e mensuráveis na paisagem, destaca-se a ocorrência de padrões espaciais que, por sua vez, possibilitaram ao modelo prever corredores preferenciais para construção de linhas de transmissão de energia. Os corredores preferenciais têm como base de análise o acúmulo da experiência adquirida ao longo de mais de vinte e cinco anos na construção destes empreendimentos e ao validar o modelo é possível considerar esta análise como uma forma de projetar e localizar linhas de transmissão de energia, conforme a escala de precisão proposta. O modelo, também permitiu confirmar a necessidade do refino das informações quando da elaboração do projeto executivo. Por outro lado, esta mesma constatação apontou outra questão de suma importância, a possibilidade de identificar variáveis explicativas não consideradas no modelo, bem como sistematizar um conhecimento tácito que é próprio do acúmulo de experiência.

Esta metodologia de extração do padrão espacial da paisagem, com a finalidade de se estabelecer corredores preferenciais à ocorrência de um determinado fenômeno, pode ter outras aplicações além da ocorrência de linhas de transmissão de energia, por exemplo, a aplicação à outras categorias de empreendimentos lineares, como rodovias, ferrovias, dutos de óleo ou gás. Auxiliando, a partir desta perspectiva, na sistematização de conhecimentos inerentes à evolução da experiência no modo de planejar e executar projetos de larga interferência na paisagem.

Este importante conhecimento definido por Polanyi (1983) como tácito é, em sua maior parte, intraduzível por aquele que o detém. Entretanto esta possibilidade de sistematização do conhecimento pode também oferecer subsídios imprescindíveis na

tentativa constante de aprimoramento da forma de projetar e construir grandes empreendimentos.

Quanto à utilização das variáveis de teste, o modelo demonstra a possibilidade da comparação entre o que é considerado como uma preferência construtiva às questões conflitantes com a existência de linhas de transmissão de energia, por exemplo, as questões sociais e questões ambientais. A utilização de uma análise baseada em multicritérios possibilitou otimizar os traçados, evitando o que se julga como restritivo à implantação das linhas de transmissão. Os desvios identificados podem ser, por sua vez, comparados ao custo ou às implicações de se optar por não desviar.

O método é passível de ser replicado, portanto indica-se, como continuidade a este estudo, a aplicação da metodologia em regiões distintas à utilizada. Tal procedimento poderá indicar se as variáveis explicativas utilizadas são determinísticas na preferência à construção de linhas de transmissão de energia ou se têm a necessidade de serem calibradas para diferentes configurações da paisagem, bem como na identificação de outras variáveis não consideradas neste modelo.

Ainda em continuidade a este projeto pode-se ter a perspectiva da associação do sistema de transporte de energia com as fontes geradoras e com os principais pontos de demanda desta energia, que são cada vez mais crescentes. Esta análise da plataforma energética do país pode utilizar da metodologia proposta por este trabalho para avaliar quais os impactos existentes nos planos de expansão do setor energético, pois uma vez que se conhece a forma atual de planejamento e execução de uma das principais bases para se concretizar esta expansão, tanto a avaliação dos impactos quanto a prévia indicação de alternativas se faz amplamente necessária.

6 REFERÊNCIAS

ABNT. **Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica (NBR 5.422)**. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

AGTERBERG, F.P; BONHAM-CARTER, G.F. **Deriving weights of evidence from geosciences contour maps for the prediction of discrete events**. XXII Int. Symposium AP-COM, 1990. 381-395

ALMEIDA, C. M. et al. **Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation**. Computers, Environment and Urban Systems, New York, v. 27, n. 5, p. 481-509, Sept. 2003

BELEM, F. L. ; FONSECA, A. R. ; PIMENTA L.C.A ; REZANDE D.T ; TAVARES T.H.B.C ; MESQUITA R.C . **Ferramenta para seleção de corredor de linha aérea de transmissão utilizando geoprocessamento**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. Anais dos XIV SBSR - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São Jose dos Campos: Ed Inpe, 2009. v. 1. p. 3559-3566.

BELEM, F. L.; FONSECA, A. R.; TAVARES T.H.B.C; ROCHA F.T; R.C; PIMENTA L.C.A. **ROTA**. 2009.

BRESSER-PEREIRA, L. C. **Crescimento e Desenvolvimento Econômico**: Notas para uso em curso de desenvolvimento econômico na Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, 2008.

BONHAM-CARTER, G. F.. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. New York: Pergamon. 1994.

CHORLEY, R.J; HAGGET, P. **Modelos Integrados em Geografia**. Rio de Janeiro, Editora Livros Técnicos e Científicos S.A., 279 p., 1974.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgar Blücher, 1998. 236 p.

EIA. **Estudo de Impacto Ambiental da Linha de Transmissão 500 kV Oriximiná - Cariri**, Biodinâmica Rio, 2009.

EIA. **Estudo de Impacto Ambiental da Linha de Transmissão 230 kV Joinville Norte - Curitiba**, Biodinâmica Rio, 2010.

Empresa de Pesquisas Energéticas. **Plano Nacional de Energia 2030 ó PNE 2030**. Rio de Janeiro, 2007.

Empresa de Pesquisas Energéticas. **Manual de Planejamento ó Metodologia, Critérios e Procedimentos. Planejamento da Expansão.** Rio de Janeiro, 2006.

EPRI-GTC. **Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology.** EPRI, Palo Alto, CA, and Georgia Transmission Corporation, Tucker, GA: 2006. 1013080.

FRISCHTAK, C.R. **O Investimento em Infraestrutura no Brasil: Histórico Recente e Perspectivas.** Pesquisa e Planejamento Econômico, v.38, n.2, p.307-348, 2008

INCRA. **Acervo Fundiário.** Disponível em: www.acervofundiario.incra.gov.br. Acesso em 10/01/2014.

LABEGALINI, P. R., LABEGALINI, J. A., FUCHS, R. D. and ALMEIDA, M. T.. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão,** 2a. edn, Edgard Blücher. 1992

LEI FEDERAL 10.847, 2004

MENDES, C. A. B.; CANALES, F. A. V. **Técnicas de regressão logística aplicada a análise ambiental.** Geografia (Londrina), v. 20, p. 5-30, 2011.

MUNIER, N.; **A Strategy for Using Multicriteria Analysis in Decision-Making: A Guide for Simple and Complex Environmental Projects.** Springer, New York, 2011

NOBREGA, R. A. A.. **Understanding Spatial-Criteria decision making: An analytical demonstration of AHP-based MCDM and how it is used in GIS.** In National Consortium for Remote Sensing in Transportation (NCRST) Annual Workshop. Memphis: NCRST/Geosystems Research Institute. 2009 URL http://www.gri.msstate.edu/publications/docs/2009/05/5939MCDM1_undestanding%20AHP.pdf.

NUNES, F.S.M. [Valoração florestal através de modelagem da rentabilidade da extração de castanha-do-brasil em Madre de Dios, Peru.](#) Brasil. Thesis (Msc). Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. Universidade Federal de Minas Gerais. 2010.

POLANYI, M.. **The tacit dimension.** London: Routledge & Kegan Paul. (1983 [1966])

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional ó PRODIST, Agência Nacional de Energia Elétrica ó ANEEL, 2013. URL <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>

SAATY, T.L.. **The Analytic Hierarchy Process.** McGraw-Hill, New York, NY. 1980

SADASIVUNI, R., C. G. O'HARA, R. A. A. NOBREGA, and J. Dumas. **A transportation corridor case study for Multi- Criteria decision analysis.** In Proceedings: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference. Baltimore, MD. 2009 URL: www.asprs.org/a/publications/proceedings/baltimore09/0082.pdf.

SCHMIDT, A. J.. **Implementing a GIS Methodology for Siting High Voltage Electric Transmission Lines.** Volume 11, Papers in Resource Analysis. 17 pp. Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press. 2009

STICH, Bethany ; HOLLAND, Joseph H. ; NOBREGA, Rodrigo A. A. ; O'Hara, Charles G. ; Nobrega, R.A.A. . **Using multi-criteria decision making to highlight stakeholders values in the corridor planning process.** *Journal of Transport and Land Use*, v. 4, p. 105-118, 2011.

SOARES-FILHO B. S., RODRIGUES H. O., COSTA W. L. S.. **Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinamica EGO.** Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil, 2009.

SOARES-FILHO, B.S; RODRIGUES, H.O; FALIERI, A; COSTA, W.L., **Dinâmica EGO.** 2008. Tutorial <http://www.csr.ufmg.br/dinamica>