

THAISA RIBEIRO TEIXEIRA

**CENÁRIOS PARA INSTALAÇÃO DE USINAS DE BIOMASSA  
FLORESTAL EM MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL

2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Teixeira, Thaisa Ribeiro, 1990-  
T266c Cenários para instalação de usinas de biomassa florestal em  
2016 Minas Gerais / Thaisa Ribeiro Teixeira. – Viçosa, MG, 2016.  
ix, 59f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.43-52.

1. Recursos energéticos - Minas Gerais. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Biomassa vegetal. 4. Eucalipto. 5. Usinas - Distribuição geográfica. 6. Logística. 7. Simulação por computador. 8. Lógica difusa. 9. Sistema de Informação Geográfica. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 333.79

THAISA RIBEIRO TEIXEIRA

**CENÁRIOS PARA INSTALAÇÃO DE USINAS DE BIOMASSA  
FLORESTAL EM MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 04 de março de 2016.

---

Alexandre Rosa dos Santos

---

Hélio Garcia Leite

---

Sady Júnior Martins da Costa de Menezes

---

Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro  
(Orientador)

*“Olhos que olham são comuns.*

*Olhos que veem são raros.”*

J. Oswald Sanders

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de aprimorar-me como pessoa e como profissional.

Aos meus pais, Lázara Abadia Ribeiro Gonçalves e José Gonçalves Teixeira, por serem os primeiros entusiastas do meu sucesso. Ao Thiago Ribeiro Teixeira, meu irmão, pela motivação, pela alegria e por nos ensinar que o silêncio vale mais que mil palavras.

Ao Vitor Fernandes, meu companheiro e agora noivo, que desde sempre me apoiou na decisão de cursar um mestrado. Ao teu lado cresço a cada dia.

Ao professor Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro, pelos ensinamentos.

Aos demais membros da banca de defesa, os professores Alexandre Rosa dos Santos, e Hélio Garcia Leite, pela valiosa contribuição para a melhoria do trabalho.

Aos colegas de laboratório, Gustavo, Alexandre, Nero, Getúlio e Pedro, pela disponibilidade e disposição para ajudar a qualquer momento. Por me receberem tão bem no grupo e pelos cafés descontraídos. Agradeço em especial ao Gustavo, que não mediu esforços para solucionar os problemas que surgiram durante esse trabalho.

Aos funcionários do DEF, em especial Alexandre e Dilson, da secretaria de pós-graduação em Ciências Florestais, pela boa vontade e prontidão para resolverem os diversos problemas burocráticos durante o mestrado. Ao Chiquinho, que sempre tem uma mensagem de ânimo.

À Fapemig, pelo apoio financeiro.

Às colegas de república, Kissia e Janaina, por compartilharem as alegrias e angústias do mestrado. Agradeço em especial à Janaina, que me ajudou muito na revisão do texto.

Aos amigos da Engenharia Florestal, que sempre estiveram comigo.

Os mais sinceros agradecimentos!!!

## **BIOGRAFIA**

THAISA RIBEIRO TEIXEIRA, natural de Patos de Minas, nasceu em 17 de janeiro de 1990. É filha de Lázara Abadia Ribeiro Gonçalves e José Gonçalves Teixeira.

Ingressou na Universidade Federal de Viçosa em 2008, no curso Engenharia Florestal, no qual se formou em 2013.

Em 2014, iniciou os estudos do Mestrado em Ciências Florestais na área de Manejo Florestal, defendendo sua dissertação em março de 2016.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	ix
Introdução Geral.....	1
Relevância da proposta .....	3
Revisão Bibliográfica.....	4
A energia da biomassa.....	4
A biomassa florestal e o potencial energético do eucalipto.....	6
O SIG e algumas metodologias do planejamento do espaço.....	7
A Lógica <i>Fuzzy</i> .....	8
O método das p-medianas .....	9
Material e Metodologia.....	12
Área de estudo .....	12
Base de dados e softwares utilizados .....	14
Zonas Restritivas .....	17
Locais potenciais para a instalação de usinas bioenergéticas.....	20
Locais ideais para instalação de usinas bioenergéticas .....	24
Fluxograma geral da metodologia .....	27
Resultados e Discussão .....	28
Conclusões .....	42
Referências Bibliográficas .....	43
ANEXO 1.....	53
ANEXO 2.....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do Estado de Minas Gerais.....	13
Figura 2: Base de dados vetorial utilizada no estudo.....	15
Figura 3: Base de dados matricial utilizada no estudo.....	16
Figura 4: Discretização dos plantios de eucaliptos em subconjuntos de produção de 5.000 m <sup>3</sup> de madeira.....	25
Figura 5: Fluxograma geral da metodologia.....	27
Figura 6: Áreas restritivas para a instalação de usinas bioenergéticas de biomassa florestal em Minas Gerais.....	28
Figura 7: Distâncias euclidianas para as variáveis Ferrovias, Rodovias, Linhas de Transmissão, Termelétricas, Plantios comerciais, Áreas Urbanas e Hidrografia.....	30
Figura 8: Funções de Pertinência aplicadas às variáveis do modelo.....	32
Figura 9: Efeito das funções de pertinência sobre as variáveis.....	33
Figura 10: Frequência de pixels em cada classe <i>fuzzy</i> .....	34
Figura 11: Índice de aptidão para a instalação de usinas energéticas a biomassa florestal no estado de Minas Gerais.....	36
Figura 12: Porcentagem de área para cada classe de aptidão para a instalação de usinas a biomassa florestal no estado de Minas Gerais.....	36
Figura 13: Pontos candidatos à instalação de usinas bioenergéticas em Minas Gerais.....	37
Figura 14: Distâncias médias de busca de matéria-prima para cada cenário de instalação de usinas bioenergéticas.....	39
Figura 15: Localizações ideais das usinas bioenergéticas para os diferentes cenários simulados, de forma a minimizar as distâncias de busca de matéria-prima.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferentes processos de conversão de energia da biomassa. (Adaptado de Staiss e Pereira (2001)). .....	4
Tabela 2: Áreas restritivas para a localização de uma usina termelétrica.....	20
Tabela 3: Relação de pontos médio, máximo e mínimo estabelecidos para as funções <i>Small</i> , <i>Large</i> e <i>Linear</i> . .....	23
Tabela 4: Proporção de áreas restritivas por tema no estado de Minas Gerais. ....	29

## RESUMO

TEIXEIRA, Thaisa Ribeiro, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2016. **Cenários para Instalação de Usinas de Biomassa Florestal em Minas Gerais.** Orientador: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Coorientador: Vicente Paulo Soares

A sociedade moderna é dependente do uso da energia nas suas mais diversas formas. Devido a questões ambientais e estratégicas, a biomassa vem despontando como uma das alternativas para a diversificação da matriz energética no mundo todo. A biomassa florestal é abundante no estado de Minas Gerais; porém, seu uso para geração de energia ainda é um nicho a ser explorado. O planejamento geográfico da produção da energia da biomassa é de extrema importância para a garantia de distribuição de energia barata e limpa. Este trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida em ambiente SIG para a prospecção de unidades energéticas à base de biomassa florestal em Minas Gerais. Primeiramente, foi feito o zoneamento de aptidão para o desenvolvimento da atividade, combinando diversos fatores ambientais, sociais e de infraestrutura do estado, por meio da lógica *fuzzy*. Em um segundo momento, foi gerado um modelo de localização-alocação envolvendo as áreas de elevada aptidão para o empreendimento, a distribuição espacial da disponibilidade de matéria-prima e a malha viária do estado. Simularam-se vários cenários com diferentes números de usinas bioenergéticas, utilizando-se um modelo de localização-alocação capacitado, de modo a consumir metade do estoque de madeira do estado. As localidades ótimas e o número ideal de usinas foram determinados de modo a minimizar as distâncias de transporte da matéria-prima até as fábricas.

## ABSTRACT

TEIXEIRA, Thaisa Ribeiro, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2016. **Scenarios for Forest Biomass Power Plants Installation in Minas Gerais.** Advisor: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Co-advisor: Vicente Paulo Soares.

Modern society is dependent on energy use in several ways. Due to environmental and strategic issues, biomass is emerging as an alternative for the diversification of energy sources worldwide. Forest biomass is abundant in the state of Minas Gerais, but its usage for power generation is still a niche to be exploited. The geographical planning of biomass energy production is of utmost importance to guarantee the distribution of cheap and clean energy. This study presents a GIS-based methodology GIS for prospecting of forest biomass power plants in the state of Minas Gerais, Brazil. First, the suitable zones for the development of the activity were identified by combining various environmental and social factors, along with State road network infrastructure, applying fuzzy logic. In a second step, a location-allocation model was generated considering only the most suitable areas for the plants development, the spatial availability of raw materials and the existing road network. Various scenarios were simulated with different numbers of bioenergy plants, using a capacitated location-allocation model, in order to consume half of the state forests biomass stock. The best locations and the optimum number of power plants were found by minimizing transport distances of raw material to the factories.

## Introdução Geral

A Revolução Industrial marcou o crescimento da economia mundial e a evolução da tecnologia no século XX se deu diante da oferta farta de energia obtida a partir dos combustíveis fósseis e do carvão mineral. O cenário mudou com a percepção da finitude desses recursos e dos impactos causados pelo uso exacerbado deles (CHERUBINI e STRØMMAN, 2011). Além disso, o aquecimento global, provocado pela emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE), despertou a atenção da sociedade no início desse século para a importância da geração de energia a partir de fontes limpas e renováveis (TRAN et al, 2013).

O crescimento econômico está diretamente ligado ao suprimento de energia e, para que haja este desenvolvimento, são necessárias segurança e sustentabilidade energética. Conseqüentemente, o aumento do consumo de energia é proporcional ao crescimento social de um país (GENUS e MAFAKHERI, 2014; CHERP e JEWELL, 2011). Diante de uma economia em desenvolvimento e da preocupação com as questões ambientais, a estruturação de uma matriz energética diversificada e sustentável é estratégica e desejável no Brasil (MME, 2008).

O uso da biomassa (florestal, agrícola ou animal) é uma fonte potencial para a geração de energia e destaca-se entre as três principais fontes energéticas brasileiras (ANEEL, 2015; ANEEL, 2008). Além de ser uma alternativa para diminuição da dependência de combustíveis fósseis, a biomassa é também uma maneira de levar energia elétrica para comunidades isoladas não atendidas pelo atual sistema interligado de distribuição de energia. Assim, os setores agropecuário e florestal mostram-se importantes não apenas pela produção de alimentos e *commodities*, mas também pela produção de energia em nível regional (SONG et al, 2015; AYLOTT et al., 2010). Minas Gerais se destaca no setor florestal, totalizando em seu território quase 1,5 milhões hectares de plantios de eucaliptos. A área de eucaliptocultura compreende 22,3% da área de florestas plantadas no país (ABRAF, 2013), o que faz com que o aproveitamento dessa biomassa florestal para a geração de energia seja realidade no estado, nas formas de carvão vegetal, de resíduos da colheita e seus produtos, da queima direta da madeira e do licor negro (COUTO et al. <sup>(1)</sup>, 2004; VENENDAAL et al., 1997).

Visto isso, o estudo do espaço geográfico é imprescindível para se verificar a viabilidade de projetos, possibilitando a otimização da produção e a redução dos custos de usinas geradoras de energia. Os estudos de aptidão territorial para a produção

bioenergética e da distribuição geográfica das usinas são exemplos de problemas de otimização espacial, que se beneficiam do contínuo aprimoramento dos métodos heurísticos, metaheurísticos, multicriteriais e redes neurais. A complexidade das variáveis envolvidas nos problemas de otimização espacial requer o emprego de modelos computacionais (SAATY e VARGAS, 2001; OWEN e DASKIN, 1998), sendo os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ferramentas importantes no suporte à tomada de decisão. Diante da possibilidade de recuperar, armazenar e visualizar dados georreferenciados, os SIG permitem análises espaciais altamente complexas, modelagem, integração de dados e simulação de cenários (NOON e DALY, 1996).

A identificação de áreas aptas para a produção energética é uma análise multifatorial, envolvendo variáveis ambientais, econômicas e sociais (COBULOGLU e BÜYÜKTAHTAKIN, 2014; VOIVONTAS et al., 2001). As variáveis comumente utilizadas no modelo de aptidão da terra podem ser estudadas segundo a teoria dos conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965), que contempla a análise de variáveis qualitativas, subjetivas e ainda daquelas que possuem limites imprecisos, como as encontradas no ambiente natural.

Visualizando um cenário com várias opções de localizações para uma indústria bioenergética, é preciso que sejam avaliadas questões como a disponibilidade da matéria prima e os respectivos custos de transporte até a fábrica, objetivando-se a diminuição do custo final da produção (SULTANA e KUMAR, 2012; KHACHATRYAN et al., 2010; VOIVONTAS et al., 2001). Sabendo-se que o maior custo de produção compreende o transporte da matéria prima até a fábrica (MACHADO, 2014; SULTANA e KUMAR, 2012; RANTA, 2005), o método de p-medianas é uma alternativa utilizada na solução de problemas de localização-alocação de indústrias bioenergéticas, visando a minimizar os custos de transporte e o tempo de viagem, priorizando também estradas com melhor infraestrutura (KHACHATRYAN et al., 2010; REVELLE e EISELT, 2005; OWEN e DASKIN, 1998).

Diante da importância estratégica da produção de energia, da complexidade econômica, ambiental e social de empreendimentos bioenergéticos e do potencial produtivo de eucaliptos em Minas Gerais, o presente trabalho apresenta um modelo de aptidão da terra para a geração de bioenergia florestal baseado na lógica *fuzzy*. Em um segundo momento, tendo em vista os altos custos de transporte da matéria-prima, propõe-se a metodologia de p-medianas para a escolha da localização-alocação ótima de plantas produtoras de energia, tendo como referência a malha viária do estado.

## **Relevância da proposta**

O Brasil tem uma das maiores matrizes de energia limpa do mundo, graças à predominância da hidroeletricidade. Em contrapartida, o país ainda peca por depender em grande parte desse tipo de energia: cerca de 68,6% da energia gerada é de origem hidráulica (ANEEL, 2015). Com isso, torna-se evidente a necessidade da diversificação das fontes de energia no país. A busca por energias mais baratas e renováveis é priorizada no Plano de Energia Nacional (MME, 2008) e se mostra ainda mais urgente no cenário atual. A crise na geração e distribuição de energia de 2001 apontou para a fragilidade do setor energético do Brasil (ANEEL, 2005) e o panorama de escassez hídrica de 2014 e 2015 reforça a insustentabilidade da acentuada dependência da energia hidrelétrica (PORTUGUAL-PEREIRA et al., 2015).

Em 2015, o estado de Minas Gerais elevou a tarifa energética em 14,24% para o consumidor residencial, 12,41% para os consumidores industriais e setor de serviços e em 15,78% para os consumidores atendidos por baixa tensão (CEMIG, 2015). O aumento do custo de produção da energia repassado ao consumidor, ou a “Conta de desenvolvimento Energético”, tem pesado no bolso do brasileiro e levado ao fechamento de indústrias. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Ferro-Ligas e Silício Metálico (ABRAFE, 2015), das 12 empresas do setor de ferro-ligas em Minas Gerais, dez estão total ou parcialmente paradas.

Por outro lado, o estado dispõe da maior produção florestal do país, totalizando quase 1,4 milhões de hectares plantados com eucaliptos, sendo grande parte da produção de eucalipto destinada à produção de carvão. Com a crise no setor siderúrgico iniciada em 2008, o negócio florestal tem sido pouco vantajoso (CI FLORESTAS, 2015). O aproveitamento da biomassa florestal como insumo para a produção energética representa um meio de aumentar a renda do pequeno produtor rural e incentivar a produção de madeira em Minas Gerais.

O potencial de geração de energia a partir de resíduos florestais tem sido assunto de diversos estudos tecnológicos (CANTO, 2009; BRAND, 2007; IAC, 2007; ALAKANGAS, 2005) e econômicos (CHEALI et al., 2015; MIRANDA, 2015; FEAM, 2014; COUTO et al. <sup>(2)</sup>, 2004; WALSH e GRAHAM, 1998; VENENDAAL et al., 1997). Porém, pesquisas que envolvam a localização geográfica ideal dos empreendimentos energéticos ainda são incipientes (COSTA, 2014; SULTANA e KUMAR, 2012; VOIVONTAS et al., 2001; ZHANG et al., 2011). Isso torna a presente

proposta atual e de importância estratégica para o desenvolvimento socioeconômico de Minas Gerais.

## Revisão Bibliográfica

### A energia da biomassa

A biomassa é uma forma de acúmulo de energia solar, convertida em energia química pelas plantas no processo da fotossíntese (SIMS, 2002). Os bioenergéticos, portanto, constituem um tipo de energia renovável, podendo ser de origem agropecuária (plantações e animais), florestal e ou de resíduos (MAPA, 2006). O conteúdo energético da biomassa depende da celulose e lignina contidas na matéria seca e do poder calorífico dos resíduos. O aproveitamento da biomassa pode ocorrer de forma direta em caldeiras e fornos ou, ainda, de forma mais complexa, como nos processos de carbonização, gaseificação, digestão anaeróbica, dentre outros, empregados na produção de combustíveis líquidos e gasosos, como metanol e etanol, gases de síntese, energia térmica e elétrica (BRIDGWATER, 2006) (Tabela 1).

Tabela 1: Diferentes processos de conversão de energia da biomassa. (Adaptado de Staiss e Pereira (2001)).

Tipos de conversão	Processos de Conversão	Energéticos	Energia
Física	Fracionamento		Térmica, elétrica e mecânica
	Densificação	Biocombustíveis Sólidos	
	Briquetagem		
Termoquímica	Combustão	Calor	Térmica, elétrica e mecânica
	Carbonização	Carvão vegetal	
	Gaseificação	Gás de síntese	
	Liquefação	Óleo de pirólise e metanol	
Físico-química	Prensagem		Térmica, elétrica e biodiesel
	Extração	Biocombustíveis líquidos	
	Tratamento químico		
Biológica	Digestão anaeróbica	Biocombustíveis gasosos ou líquidos	Térmica, elétrica e etanol
	Fermentação		

O uso da biomassa para fins energéticos está associado à precariedade da população em países pobres, ao desmatamento e à desertificação (GOLDEMBERG, 2009). Mas graças aos avanços tecnológicos e às pesquisas voltadas para melhoria da eficiência de conversão de energética, essa imagem tem mudado (ROSILLO-CALLE et al., 2000). O uso tradicional da biomassa (lenha e carvão vegetal) está sendo substituído por biocombustíveis de alto rendimento energético e de amplas vantagens ambientais.

Os resultados são formas mais eficientes de geração e cogeração de bioenergia como, por exemplo, o bioálcool, o biodiesel e o bio-hidrogênio (VIGUIRISTI, 2008; HALL et al., 2005).

A maximização do aproveitamento bioenergético depende da tecnologia industrial adotada nos processos produtivos e da tecnologia de geração termelétrica de maior eficiência (EPE, 2008). Dentre as linhas de pesquisa envolvidas nas melhorias da produção de combustíveis a partir da biomassa celulósica, destacam-se: melhoramento genético das plantas, visando maior produtividade no campo e plantios sustentáveis; elaboração de enzimas e compostos envolvidos no pré-tratamento da matéria-prima e na degradação da lignina; e tecnologias para aumentar a eficiência da conversão energética. (IAC, 2007).

O Brasil destaca-se pelo pioneirismo na pesquisa voltada para a produção de etanol obtido da cana-de-açúcar, graças ao Programa Nacional do Álcool – Proálcool, que foi idealizado pelo físico José Walter Batista Vidal e pelo engenheiro Urbano Ernesto Stumpf (GORDINHO, 2010). No ano de 1973, durante os conflitos árabe-israelenses, os principais produtores de petróleo passaram a regular as exportações, quadruplicando o preço do barril. A economia mundial foi afetada, e principalmente a do Brasil, que dependia em 80% do petróleo importado. Como meio de reagir à crise do petróleo da década de 70 e à queda do preço do açúcar no mercado, o governo brasileiro, aliado aos grandes produtores e subsidiado pelo Banco Mundial, promoveu a produção, a pesquisa e o desenvolvimento de biocombustíveis, aproveitando a grande produção de cana-de-açúcar, a disponibilidade de terras e a estrutura física das usinas (NITSCH, 1991). Dentre alguns resultados mais significativos do Proálcool, podem-se observar as novas variedades de cana, desenvolvidas em diversos institutos de pesquisa, as técnicas de produção agrícola e industrial, como a fertirrigação com o vinhoto e as novas técnicas de fermentação alcoólica, o desenvolvimento de máquinas agrícolas adequadas à realidade brasileira, e o reaproveitamento do bagaço da cana para a geração de energia (SHIKIDA, 2011).

O biodiesel e o etanol derivados da cana-de-açúcar, cereais, grãos, e oleaginosas, classificados como combustíveis de primeira geração, precederam o desenvolvimento de novas tecnologias de aproveitamento de outras fontes agrícolas bioenergéticas (GOLDEMBERG, 2009; COUTO et al.<sup>(1)</sup>, 2004). A nova geração de combustíveis (combustíveis de segunda geração) é produzida a partir de fontes lignocelulósicas, como

resíduos agrícolas e florestais, e vem com a premissa de evitar conflitos entre produção bioenergética e a produção alimentícia (COBULOGLU e BÜYÜKTAHTAKIN, 2014; VAN EIJK et al, 2014).

### **A biomassa florestal e o potencial energético do eucalipto**

O Ministério de Minas e Energia, no Plano Nacional de Energia, definiu a energia da biomassa florestal como: “biocombustíveis provenientes dos recursos florestais, seus produtos e subprodutos, que incluem biomassa lenhosa, produzida de forma sustentável a partir de florestas cultivadas ou de florestas nativas, obtida por desflorestamento de floresta nativa para abertura de áreas para agropecuária, ou ainda originada em atividades que processam ou utilizam a madeira para fins não energéticos, destacando-se a indústria de papel e celulose, indústria moveleira, serrarias etc.” (MME, 2008, p. 104).

O uso da madeira na forma de lenha tem um papel importante na história, pois foi a primeira fonte energética da humanidade (BRITO, 2007). Por outro lado, tecnologias atuais têm melhorado o aproveitamento energético da madeira, nas formas de carvão vegetal, pellets, licor negro, combustíveis líquidos, energia elétrica, dentre outros. No presente, grande parte da bioenergia gerada advém de processos de cogeração, envolvendo um subproduto da produção de celulose – a lixívia ou licor negro. Esta energia é aproveitada na própria indústria e muitas vezes ainda é disponibilizada no mercado. Como exemplos dessas usinas de aproveitamento, podem-se citar a Usina de Aracruz (atual Fíbria), no Espírito Santo, com 150 MW de capacidade de geração, a da Cenibra, em Belo Oriente – MG, com 100 MW, e Bahia Sul (atual Unidade Mucuri, da Suzano), Mucuri – BA, com 92 MW de potência (ANEEL 2005). Outros resíduos podem ser gerados durante a colheita ou durante o processamento da madeira, como cascas, galhos, lascas, cavacos de lenha e costaneiras. Lima (1998) estima que apenas 50% da matéria-prima é aproveitada em serrarias, indicando a grande disponibilidade de resíduos nesse setor. Esses resíduos apresentam potencial para aproveitamento energético para a própria fábrica, na forma de briquetes de madeira e de carvão, carvão vegetal, pellets e até mesmo na combustão direta (BRIDGWATER, 2006).

Devido a este grande potencial de aproveitamento energético, o manejo correto de florestas nativas pode transformá-las em fontes inesgotáveis de biomassa. O processo consiste na retirada planejada de árvores adultas e reposição de mudas novas em seu lugar, de forma que a floresta mantenha o número de plantas em crescimento estável.

Porém, a disponibilidade de resíduos florestais advindos dessa atividade é incerta e espacialmente dispersa, inviabilizando sua utilização em escala comercial para fins energéticos (EPE, 2008). Há ainda muitos estudos envolvendo a produção de óleos vegetais a partir de culturas nativas da região Amazônica, como o dendê, o buriti, o babaçu e a andiroba. Esses óleos possuem alto rendimento energético e podem ser queimados em caldeiras e motores de combustão interna, para a geração de energia elétrica e atendimento de comunidades isoladas do sistema elétrico (FREITAS et al., 1996).

O Brasil apresenta grande potencial de produção florestal. A ABRAF (2013) estima que, no ano de 2012, a área ocupada por plantios florestais de eucaliptos e pinus no Brasil totalizou 6.664.812 ha, sendo 76,6%, i.e., 5,105,246 ha, correspondentes à área de plantios de eucaliptos. O setor florestal no Brasil mostra-se competitivo no mercado mundial pelas vantagens em custos de produção, solos e clima favoráveis, disponibilidade de área e mão-de-obra, conhecimento científico e tecnológico, alta produtividade, capacidade organizacional da iniciativa privada, experiências bem-sucedidas de longo prazo com qualidade de produtos e tecnologia (MME, 2008).

Apesar do grande volume de florestas plantadas e da expressividade da produção de bioenergia de origem florestal na matriz energética brasileira, o potencial produtivo do setor ainda é subutilizado. Há estimativas de que são gerados anualmente cerca de 41 milhões de toneladas de resíduos madeireiros provindos da indústria de processamento de madeira e da colheita florestal (ABRAF, 2013). Esse volume é capaz de gerar energia equivalente a 1,7 GW/ano, ao passo que são gerados atualmente apenas 0,38 GW/ano (ANEEL, 2015).

### **O SIG e algumas metodologias do planejamento do espaço**

No contexto de planejamento estratégico da infraestrutura da energia, a tecnologia dos Sistemas de Informações Geográficas é imprescindível para se executar, com exatidão e rapidez, o mapeamento detalhado dos recursos disponíveis, a superposição de inúmeras camadas de dados e simular cenários complexos (PANICHELLI e GNANSOUNOU, 2008; JANKOWSKI, 1997). Os diferentes critérios (favoráveis e/ou restritivos) analisados podem ser representados como planos de informações geográficas (*layers* ou temas) em um ambiente SIG, de forma a se criar um cenário condizente com a realidade. O próximo item trata de ferramentas e metodologias que auxiliam o planejamento do espaço, inclusive no contexto bioenergético.

## A Lógica *Fuzzy*

Para a avaliação da viabilidade de se instalar uma planta bioenergética, é necessário, dentre outros aspectos, levar em conta a disponibilidade de matéria prima, o cálculo do rendimento energético das culturas, os custos de produção e de transporte, as limitações ambientais, econômicas e tecnológicas (FREPPAZ et al., 2004; VOIVONTAS et al., 2001). A partir de então, tem-se que a Análise multicritério – Multicriteria Evaluation (MCE) - é amplamente aplicada na solução de problemas espaciais complexos (DONG, 2008; JOSS et al., 2007; MALCZEWSKI, 2004; JIANG e EASTIMAN, 2000). Esta análise envolve o uso simultâneo de técnicas como a lógica booleana e a combinação linear ponderada - Weighted Linear Combination (WLC) - no suporte à tomada de decisão, partindo de uma variedade de critérios de diferentes preferências entre as alternativas (JANKOWSKI, 1997). De maneira generalista, a lógica booleana assume que valores verdadeiros (1) correspondem à adequabilidade e os falsos (0) indicam as áreas com características contrárias ao objetivo do estudo (MALCZEWSKI, 2004). Já a WLC consiste na padronização dos valores contínuos em uma escala numérica e na combinação dos critérios em uma média ponderada, a depender dos pesos atribuídos no Processo de Hierarquia Analítica - Analytic Hierarchy Process (AHP) (JIANG e EASTIMAN, 2000; SAATY, 1987).

Apesar da ampla aceitação da MCE no meio acadêmico, alguns problemas inerentes ao modelo são relatados. Joss et al. (2007) citam a ineficiência da técnica booleana ou binária quando as variáveis quantitativas não estão disponíveis ou, ainda, quando a modelagem envolve um grande número de variáveis qualitativas. Este problema é facilmente constatado, pois resulta em um mapa de feições discretas, raramente descrevendo fenômenos naturais de maneira fiel (JIANG e EASTIMAN, 2000). Outro problema relacionado à WLC é a dificuldade de padronização das variáveis e a subjetividade ao atribuir pesos às mesmas, necessitando-se de uma consulta a uma equipe especialista no assunto (KANGAS et al., 2006; LAUKKANEN et al., 2002; JIANG e EASTIMAN, 2000).

A lógica nebulosa - ou método *fuzzy* - quando implementada em um ambiente SIG, apresenta-se como uma alternativa diante dos problemas encontrados na MCE (KANGAS et al., 2006; SICAT et al. 2005; COLLINS et al., 2001; JIANG e EASTIMAN, 2000). Desenvolvida por Zadeh (1965), a teoria dos conjuntos *fuzzy* é uma forma de expressar, em uma linguagem numérica, as informações subjetivas, incertas e qualitativas, como as encontradas no meio ambiente (SILVERT, 2000). Um conjunto

*fuzzy* é um conjunto que reflete classes de elementos de fronteiras incertas, sendo difícil definir quais elementos pertencem ou não ao conjunto (COLLINS et al., 2001).

A ideia central desta teoria consiste na flexibilização do modelo matemático clássico de conjuntos. Um conjunto *fuzzy*  $A$  no universo  $X$  é caracterizado pela função  $f_A(x)$  que associa cada ponto  $x$  em  $A$  a um número infinito de valores no intervalo de  $[0,1]$ , sendo representado por  $A = \{\mu_A(x), x\} x \in X$ , em que  $\mu_A(x)$  indica o grau de pertinência, i.e., a probabilidade de  $x$  pertencer ao grupo  $A$  (ZADEH, 1965). Assim, atribui-se uma escala de pertinência aos critérios, em que valores próximos a 0 representam a “falsidade” e os próximos a 1 indicam a “veracidade” da proposta (KANGAS et al., 2006).

A função de pertinência ou a parametrização dos critérios se apresenta de maneira complexa, podendo ser por meio de ajuste sigmoideal, linear, gaussiano, triangular, trapezoidal, dentre outros, a fim de descrever melhor o comportamento dos fenômenos envolvidos (JIANG e EASTIMAN, 2000). A parametrização das variáveis segundo a lógica *fuzzy* permite a menor interferência da opinião dos analistas, já que estes não definem o peso das variáveis, e sim, os valores máximos e mínimos para que os dados sejam aceitos no modelo (KANGAS et al., 2006).

O estudo de aptidão do espaço para geração de energia foi objeto de estudo de Kühmaier et al. (2014), sendo a lógica *fuzzy* utilizada para alocar unidades produtoras de energia a partir da biomassa florestal. Wu (2011) combinou as metodologias *fuzzy* e AHP para selecionar áreas apropriadas à produção de etanol oriundo de madeira. Aydin et al. (2010) aplicaram a teoria dos conjuntos *fuzzy* no planejamento espacial de sistemas de energia eólica; Charabi (2011) aplicou esta mesma lógica para o estudo de áreas aptas para a geração de energia solar; Lewis (2015) estudou a localização-alocação de usinas energéticas movidas a resíduos agrícolas.

### **O método das p-medianas**

O pré-requisito para a construção de uma usina bioenergética é presença de grandes cultivos concentrados em uma determinada área, já que a disponibilidade de biomassa é, na maioria das vezes, geograficamente dispersa (KUMAR et al., 2003). Essa característica induz a altos custos de busca da matéria-prima, muitas vezes inviabilizando o aproveitamento energético da biomassa (COMBER et al., 2015; HÖHN et al., 2014; SULTANA e KUMAR, 2012; FARAHANI et al., 2010; VOIVONTAS et al., 2001). Por isso, um dos fatores mais limitantes no planejamento e

desenvolvimento de uma cadeia de agroenergia é o suprimento constante e de longo prazo de biomassa, associado a baixos custos de transporte (KHACHATRYAN et al., 2010; VAN DAM et al., 2007).

É imprescindível o planejamento holístico da indústria bioenergética para se reduzirem os custos, ampliarem os lucros e prover alto nível de serviço aos clientes. Assim, é possível perceber que diversos autores têm se preocupado com a localização ideal de usinas bioenergéticas, aplicando formulações heurísticas juntamente com outras técnicas em um ambiente SIG (sensoriamento remoto, análise multicritério, tesselação de Voronoi, análise de redes), em estudos de localização-alocação de usinas bioenergéticas. (COMBER et al., 2015; HÖHN et al.; 2014; SULTANA e KUMAR, 2012; DONG, 2008; ZHAN et al., 2005; RANTA, 2004).

Os modelos de localização-alocação são ferramentas importantes no planejamento de diversas atividades que consistem em uma rede, onde as facilidades e demandas são nós ou vértices e os arcos são as rotas de transporte, coleta e entrega (POLO et al., 2015; WANG e SHI, 2015; HÖHN et al., 2014; ZHANG et al., 2011; OWEN e DASKIN, 1998). O problema das p-medianas é o mais aplicado na solução de problemas de localização-alocação (DONG, 2008), consistindo em localizar as facilidades - ou medianas - em uma rede, de modo a minimizar as distâncias médias do conjunto de pontos de demanda à sua mediana mais próxima (SULTANA e KUMAR, 2012, OWEN e DASKIN, 1998).

Hakimi (1964) fez a primeira descrição da teoria das p-medianas ao tentar alocar centrais telefônicas em uma rede de comunicação e estações policiais ao longo de estradas. Church e ReVelle (1974) elaboraram um modelo de Programação Linear Inteira com base na teoria das p-medianas já que, nesse tipo de programação, estático e determinístico, as variáveis são inteiras e/ou reais não-negativas, como em um modelo binário (OWEN e DASKIN, 1998). O modelo binário descrito por Church e ReVelle (1974) pode ser expresso por:

$$\text{Min} \sum_{ij} w_i x_{ij} d_{ij} \tag{1}$$

sujeito a:

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad i \in N \tag{2}$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad j \in N \tag{3}$$

$$\sum_i y_j = p \quad (4)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \quad i, j \in N \quad (5)$$

em que

$i$  é o índice dos pontos de demandas;

$j$  é o índice das pontos de facilidades potenciais;

$d_{ij}$  é a distância entre a demanda  $i$  e a facilidade  $j$ ;

$w_i$  é o custo de transporte associado a cada ponto de demanda  $i$ ;

$p$  é o número de facilidades a serem localizadas;

$x_{ij}$  é a proporção da demanda no ponto  $i$  que está associada à facilidade no ponto  $j$ .

As restrições (2) e (3) garantem que qualquer demanda  $i$  seja atendida por somente uma facilidade  $j$ . A restrição (4) determina o número exato de medianas a serem localizadas ( $p$ ), e a restrição (5) assegura que os resultados sejam inteiros e atendam às condições binárias (0 ou 1).

Esse modelo de problema de  $p$ -medianas pode envolver pesos ou não, dependendo dos custos de transporte ou das dificuldades (impedâncias) envolvidas com cada rota (custo de transporte, tempo de viagem, inclinação do terreno, estado de conservação das vias, dentre outros). Tais características são, via de regra, anisotrópicas, i.e., variam de acordo com o sentido em que a via é percorrida, e.g., morro acima ou morro abaixo, a favor ou contra o vento, dentre outros (OWEN e DASKIN, 1998).

Os problemas típicos de otimização de localização são ricos em informações, o que os tornam bastante complexos e, por vezes, de solução exata impossível, tamanho o número de possibilidades de combinações (OWEN et al., 1998; NOON e DALY, 1996). Existem algumas variações de tipos de problemas  $p$ -medianas; dentre eles o modelo em que é possível considerar, por exemplo, a proporção da demanda de cada vértice cliente. Nesse caso, a solução ótima é dada pela combinação dos diferentes pontos de demandas e facilidades candidatas (6), podendo tornar-se impossível de resolver ou demandar muito tempo, dependendo no tamanho da rede e do número de vértices envolvidos (REVELLE e ELSELT, 2005). Nestes casos, os métodos determinísticos apresentam uma solução ótima, porém inviável de ser obtida na prática. O número total de combinações é dado por:

$$\binom{N}{P} = \frac{N!}{P! \times (N - P)!} \quad (6)$$

em que  $N$  é o número total de vértices na rede.

Para a solução de problemas complexos, NP-difícil (*NP-hard*) ou não-determinístico em tempo polinomial, aplicam-se métodos aproximativos de programação inteira e heurísticas (OWEN e DASKIN, 1998). Dentre as formulações e metaheurísticas aplicadas a problemas complexos de localização-alocação, destacam-se os algoritmos genéticos, a busca por espalhamento, a têmpera simulada (*simulated annealing*), a pesquisa tabu (*Taboo Search*), o problema do caixeiro viajante e a relaxação lagrangeana (QI et al., 2015; RECHE-LÓPEZ et al., 2009; PIRKUL e JAYARAMAN, 1998; KIRKPATRICK et al., 1983).

As metodologias aproximativas implementadas nos aplicativos SIG são ferramentas importantes no planejamento e na tomada de decisão, tanto no setor público quanto no privado (SULTANA e KUMAR, 2012). A extensão *Network Analyst* do software ArcGIS oferece uma gama de ferramentas de análise de redes; dentre elas destaca-se a opção *Location-Allocation*, que permite a escolha do número de instalações a partir de um conjunto de locais potenciais, de forma que as demandas serão assinaladas às instalações de uma forma ideal. Além disso, o algoritmo aloca as facilidades de modo a evitar a concorrência entre elas e, implementado, combina várias técnicas, adotando uma heurística de substituição de vértices e uma metaheurística de refino para se alcançar uma boa solução, ótima ou próxima a ela (ARAKAKI, 2002).

## **Material e Metodologia**

### **Área de estudo**

O presente estudo contempla todo o estado de Minas Gerais (Figura 1), localizado na Região Sudeste do país, entre os paralelos de  $14^{\circ}13'58''$  e  $22^{\circ}54'00''$  de latitude sul e os meridianos de  $39^{\circ}51'32''$  e  $51^{\circ}02'35''$  a oeste de Greenwich. Segundo o IBGE, Minas Gerais é o quarto estado com maior área territorial do Brasil, totalizando  $586.519,727$  km<sup>2</sup>, subdivididos em 853 municípios.

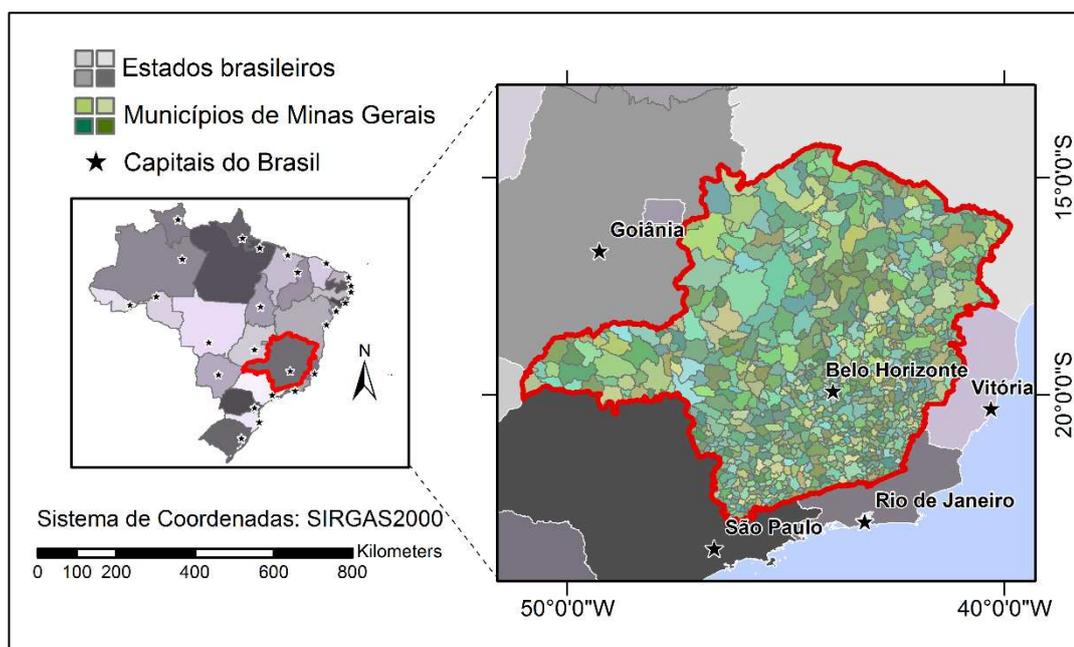


Figura 1: Localização do Estado de Minas Gerais.

A grande extensão territorial de Minas Gerais contribui para a existência de diferenças significativas no que se refere aos seus aspectos geográficos e econômicos. O estado apresenta os climas Tropical com verão seco – As, Tropical com inverno seco – Aw, Subtropical úmido clima oceânico sem estações secas – Cfa, Subtropical úmido clima oceânico com verão temperado – Cfb, Subtropical úmido com inverno seco e verão quente – Cwa e Subtropical úmido com inverno seco e verão temperado – Cwb, segundo a classificação de Köppen, adaptada para o Brasil por Alvares et al. (2013). Os mesmos autores constaram que as temperaturas nesse estado variam de 10,4° a 25,8° e precipitação varia de 780 a 1.800 mm anuais.

O relevo de Minas Gerais apresenta altitudes de 900 a 2.685 metros, observando-se expressivas formações montanhosas (Pico da Bandeira, Serra do Caparaó, Serra do Espinhaço, dentre outras), planaltos, escarpas e depressões. O relevo acidentado abriga inúmeras nascentes, atribuindo ao estado o título popular de “caixa d’água” do Brasil (IGAM, 2013). Em Minas Gerais existem mais de 10 mil cursos d’água, o que corresponde a 8,3% dos rios e lagos naturais e artificiais do país; seus limites geopolíticos interceptam 17 bacias hidrográficas federais. Dentre as hidrografias pertencentes a Minas Gerais, destacam-se os rios São Francisco, Jequitinhonha, Doce, Grande, Paranaíba, Mucuri e Pardo (IGAM, 2013).

A infraestrutura de Minas Gerais é propícia à logística e escoamento da produção brasileira. O estado apresenta a maior malha rodoviária do país, totalizando 29.594 km de estradas pavimentadas, de domínio estadual e federal, além de 6.322 km

de trechos não pavimentados (DER – MG, 2015). A história das estradas mineiras se inicia com os Bandeirantes, no século XVI, que abriram trilhas e caminhos no sertão em busca de ouro e diamante. Logo os caminhos se tornaram estradas reais que trouxeram desenvolvimento urbano para as vilas e arraiais (DER – MG, 2015). O relevo montanhoso do estado e a desatualização do traçado de sua malha rodoviária faz com que existam muitas estradas com curvas acentuadas, dificultando a manutenção e onerando o escoamento da produção.

Já a malha ferroviária começou a ganhar força ainda na época do império e teve papel importante na ligação dos estados de Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia para escoamento da produção de café e outros produtos agrícolas (DENIT, 2015). A atividade ferroviária reduziu-se em troca da construção das estradas rodoviárias na década de 1940. Ainda estão em funcionamento a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), a antiga Estrada de Ferro Leopoldina e a Ferrovia do Aço (DER – MG, 2015).

#### **Base de dados e softwares utilizados**

Os dados vetoriais utilizados no presente estudo são disponibilizados por instituições brasileiras em formato *shapefile* e alimentaram o modelo de localização ótima das usinas bioenergéticas à biomassa florestal. São eles (Figura 2):

- Mapa das unidades de conservação do Brasil, disponibilizado pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMbio).
- Mapa das terras indígenas brasileiras, disponibilizado pela Fundação Nacional do Índio (Funai).
- Mapas das linhas de transmissão e usinas termelétricas, disponibilizados pelo Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL), da ANEEL.
- Mapas dos aeródromos, ferrovias, rodovias e hidrografia, disponibilizados no portal GeoMinas (UFV).
- Mapeamento da cobertura vegetal do estado de Minas Gerais, disponibilizado pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF) em 2009, contendo dados relativos à distribuição da vegetação natural e dos reflorestamentos de eucaliptos do estado, e ainda outras classes referentes aos corpos d'água, veredas e à urbanização. Deste mapeamento, selecionaram-se e derivaram-se novas feições de plantios comerciais de eucaliptos e áreas urbanas.

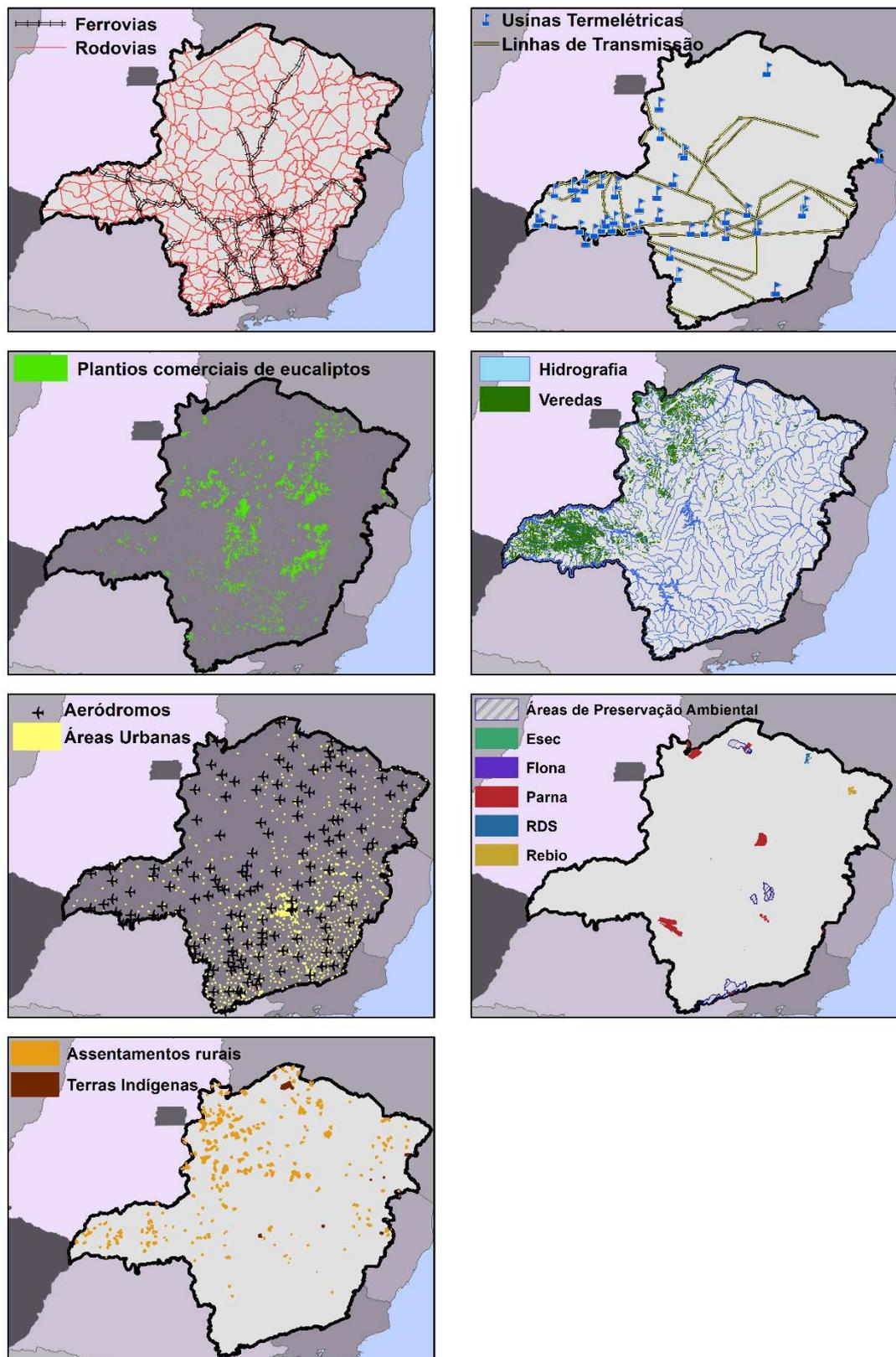


Figura 2: Base de dados vetorial utilizada no estudo.

Os seguintes dados matriciais complementaram o estudo (Figura 3):

- Modelo Digital de Elevação (MDE) extraído da base SRTM - Shuttle Radar Topography Mission, produzida por interferometria de imagens de radar. No

Brasil, essas imagens são disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram utilizadas 48 quadrículas mosaicadas de 1° de latitude por 1,5° de longitude e com células de aproximadamente 30 metros.

- Série histórica de 50 anos da precipitação pluviométrica mensal e temperaturas máximas mensais, disponíveis na base de dados WorldClim.

A inclinação do terreno do terreno em graus decimais foi obtida a partir do MDE, após a correção das depressões espúrias, utilizando-se o comando *Slope* da extensão Spatial Analyst do software ArcGIS. Ainda com base nesse MDE, obteve-se a radiação solar anual, por meio da ferramenta *Area Solar Radiation*. A radiação foi calculada quinzenalmente, sendo consideradas 14h de radiação por dia. Essa radiação foi extrapolada para todo o ano.

A produtividade esperada do eucalipto aos 6 anos foi estimada em função da temperatura máxima média, precipitação total anual e radiação solar anual, segundo a regressão múltipla 3-PG proposta por Borges (2012):

$IMA = 58,72 - 5,6530 * T_{max} + 12,5701 * prec + 0,9050 * prec^2 - 6,365 * NMSC + 9,2228 * RAD$   
em que: IMA = produtividade média anual ( $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ );  $T_{max}$  = média das temperaturas máximas anuais ( $^{\circ}C$ );  $prec$  = Precipitação pluviométrica total anual (mm);  $NMSC$  = n° de meses sem chuva;  $RAD$  = radiação total anual ( $MJ m^{-2} ano^{-1}$ ).

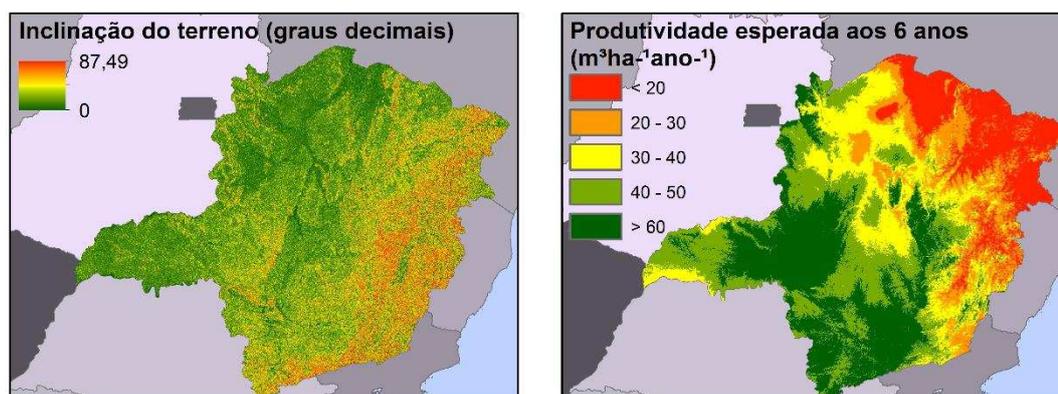


Figura 3: Base de dados matricial utilizada no estudo.

Todos os dados espaciais foram importados para uma estrutura *Geobase* como classes de feições e conjuntos de dados raster, para que processamentos mais complexos fossem suportados. Tendo em vista que a área de estudo se estende por três zonas UTM (*Universal Transversa de Mercator*), adotou-se a Projeção cônica de áreas verdadeiras de Albers, Datum SIRGAS 2000, já que essa conserva as áreas entre os paralelos-

padrão estabelecidos. Utilizaram-se as ferramentas *Project* e *Project Raster*, considerando-se os seguintes parâmetros:

- Meridiano central: 45,45°W
- Latitude de origem: 22,95°S
- 1° Paralelo-padrão: 15,67°S
- 2° Paralelo-padrão: 21,47°S

Foram utilizadas a caixa de ferramentas *Data Management Tools* para a estruturação das bases de dados e as extensões *Network Analyst* e *Spatial Analyst*, do software ArcGIS versão 10.3, para o desenvolvimento de análises espaciais. Os dados finais foram organizados e os gráficos gerados por meio de uma planilha de Excel do pacote Office 2010 da Microsoft.

### **Zonas Restritivas**

Nem todo o território mineiro apresenta-se apto para a instalação de empreendimentos. Alguns fatores inerentes ao espaço são de natureza restritiva e devem ser descartados no modelo de aptidão. As restrições podem ser de ordem legal, ambiental, econômica ou, ainda, relacionadas à garantia da segurança da população. Levando em conta o potencial poluidor e os riscos característicos de uma usina termelétrica, consideraram-se os seguintes planos de informação para compor inicialmente a *geobase* deste estudo: terras indígenas, assentamentos rurais, unidades de conservação, hidrografia, veredas, inclinação do terreno, zonas urbanas, plantios comerciais, linhas de transmissão, rodovias, ferrovias e aeródromos.

As terras indígenas são áreas do poder público, inalienáveis e indisponíveis, onde os povos indígenas vivem segundo seus costumes tradicionais. Os assentamentos rurais são unidades agrícolas instaladas pelo Inbra, onde os trabalhadores rurais produzem alimentos utilizando a mão de obra familiar. Os assentados pagam pela terra recebida do Inbra e pelos créditos que subsidiam a produção familiar até que possuam a escritura do lote; logo, não podem vender, alugar, doar, arrendar ou emprestar sua terra a terceiros sem ter em mãos a escritura definitiva. Nesse estudo, foram excluídos os Assentamentos e as Terras indígenas do estado de Minas Gerais, a fim de evitar conflitos com terras da União.

As unidades de conservação (UCs) são áreas de grande beleza cênica, de rica diversidade ecológica e são protegidas por força de Decreto presidencial ou por Lei. As

categorias de unidades de conservação podem ser de uso sustentável ou de proteção integral, a depender da fragilidade do ecossistema. Segundo a Lei nº 9.985/2000, que institui o Sistema Nacional de Unidade de Conservação - SNUC, as UCs, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental - APA e das Reservas Particulares do Patrimônio Natural – RPPN, devem ser circundadas por uma zona de amortecimento, onde as atividades humanas são restritas, a fim de minimizar os impactos sobre as áreas protegidas (BRASIL, 2000). A Resolução CONAMA nº 013/1990 estabelece o licenciamento ambiental, pelo órgão competente, de qualquer atividade que venha afetar o ecossistema, em um raio de até 10.000 metros a partir da UC (BRASIL, 1990).

Neste estudo, considera-se a necessidade ou não de zonas de amortecimento. As unidades de conservação foram divididas então em dois temas (ou planos de informação): o primeiro deles se refere às unidades de conservação e suas respectivas zonas de amortecimento e, o segundo, às APAs e RPPNs.

O anexo VIII da Lei nº 6.938/1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981), enquadra as indústrias termelétricas como “serviços de utilidade” que possuem potencial médio de poluição e utilizam-se de recursos naturais. A hidrografia é um importante fator a ser considerado nesse caso, para que sejam satisfeitas as exigências do licenciamento ambiental. A Portaria MINTER nº 124/1980, que regulamenta a localização de indústrias potencialmente poluidoras em relação aos recursos hídricos, prevê que as unidades que armazenam substâncias com potencial de poluição hídrica devem ser estabelecidas a, no mínimo, 200 m da hidrografia (BRASIL, 1980).

As veredas também são consideradas zonas exclusivas, por se tratarem de áreas ambientalmente sensíveis. O Código Florestal (Lei nº 12.651/2012) as define como áreas de preservação permanente. Tanto o inciso XI do artigo 4º desta lei, quanto a Lei nº 20.922/2013, que dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade de Minas Gerais, tratam da obrigatoriedade da preservação de uma faixa com 50 metros de largura a partir da área brejosa e encharcada (MINAS GERAIS, 2013).

Outro fator limitante à instalação de plantas energéticas é a inclinação do terreno. Terrenos íngremes impedem a instalação de plantas energéticas por apresentarem altos custos de implantação e riscos de deslizamentos de terra e de erosão (PERPIÑA et al, 2013; DONG, 2008; RAMOS, 2000). Além disso, altas inclinações de terrenos dificultam o acesso às florestas, elevando os custos de colheita e de transporte

da matéria prima (MACHADO, 2014; VIANA, 2010; PANICHELLI, 2008). Dong (2008), em seu trabalho, definiu áreas com inclinação do terreno superior a 15° (cerca de 25%) como limitantes para localização de usinas de biomassa.

Segundo SULTANA e KUMAR (2012), os locais mais apropriados para a construção de usinas bioenergéticas devem ser próximos aos plantios que constituem a matéria prima para a produção. Porém, devem-se evitar as áreas de plantios comerciais propriamente ditas. O mesmo raciocínio é aplicado às áreas urbanas, dada a grande concentração de linhas de transmissão, de estradas, dutos e disponibilidade de água. Para os perímetros urbanos criaram-se zonas-tampão (áreas de exclusão) de 1 km de largura, a fim de se evitarem problemas industriais que possam afetar a vida da população. Foram criadas também zonas-tampão com 30 metros de largura a partir das rodovias, ferrovias e linhas de transmissão.

Usinas energéticas emitem quantidades consideráveis de gases e armazenam combustíveis, representando riscos de incêndios (DONG, 2008). Deve-se, assim, considerar a distância mínima aos aeroportos, garantindo a boa visibilidade e a segurança dos transportes aéreos. No Brasil, as normas relacionadas à segurança aérea encontram-se na Lei nº 7.565/1986 (BRASIL, 1986). O artigo 1º da Resolução CONAMA nº 4/1995 assim define a extensão da Área de Segurança Aeroportuária (ASA) (BRASIL, 1995):

Art. 1º São consideradas “Área de Segurança Aeroportuária – ASA” as áreas abrangidas por um determinado raio a partir do “centro geométrico do aeródromo”, de acordo com seu tipo de operação, divididas em 2 (duas) categorias:

I - raio de 20 km para aeroportos que operam de acordo com as regras de voo por instrumento (IFR);  
e

II - raio de 13 km para os demais aeródromos.

Os aeroportos de Araxá, Pampulha, Barbacena, Tancredo Neves (Confins), Usiminas (Santana do Paraíso), Juiz de Fora, Montes Claros, Uberlândia, Uberaba e Varginha, que são regidos pela normatização IFR (ANAC, 2015), receberam ASAs de raio de 20 km. Para os demais aeródromos, criam-se ASAs de 13 km de raio.

A Tabela 2 resume os critérios restritivos para a instalação de uma usina bioenergética.

Tabela 2: Áreas restritivas para a localização de uma usina termelétrica.

<b>Tema</b>	<b>Restrição ou tipo de feição</b>
Terras Indígenas	Polígonos
Assentamentos	Polígonos
Unidade de Conservação de Proteção Integral	Polígonos + Distância $\leq$ 10.000 m
Unidade de Conservação de Uso Sustentável (APA + RPPN)	Polígonos
Hidrografia	Distância $\leq$ 200 m
Veredas	Distância $\leq$ 50 m
Inclinação do terreno	$\geq$ 25%
Plantios comerciais (Eucaliptos)	Polígonos
Áreas urbanas	Polígonos + Distância $\leq$ 1.000 m
Ferrovias, Rodovias, Linhas de transmissão	Distância $\leq$ 30 m
Aeródromos com normatização IFR	Distância $\leq$ 20.000 m
Aeródromos sem normatização IFR	Distância $\leq$ 13.000 m

As feições de todos os temas foram dissolvidas visando à eliminação de bordas comuns e diminuindo a complexidade dos dados e o tempo de processamento. As áreas de restrições foram criadas pelo comando *Buffer* (quando necessário) e as áreas que ultrapassaram os limites da área de estudo foram excluídas (comando *Clip*). Para facilitar as análises, foi criado um campo Auxiliar na tabela de atributos de cada tema, sendo-lhe atribuído o valor 1 para todos os registros. Para o tema Minas Gerais, o campo Auxiliar recebeu valor 0. Cada tema então foi unido ao tema Minas Gerais (*Update*) e convertido para o formato raster, sendo que as feições referentes aos temas restritivos mantiveram o valor 1 e o restante da área de estudo, valor 0. O tema inclinação do terreno foi reclassificado de acordo com o seguinte critério: inclinações de terrenos entre 0 e 15° receberam valor NODATA, i.e., foram removidas do respectivo plano de informação; as iguais ou superiores a 15° receberam valor 1. A sobreposição dos temas, pela álgebra de mapas, deu-se pelo comando *Boolean OR*, disponível na caixa de ferramentas *Logical* da extensão *Spatial Analyst* do ArcGIS.

### **Locais potenciais para a instalação de usinas bioenergéticas**

Diversos fatores espaciais influenciam o planejamento estratégico de uma indústria bioenergética, possibilitando ou limitando a acessibilidade, a capacidade de expansão, a disponibilidade de matéria-prima e mão-de-obra, além da minimização de impactos ambientais e sociais. Nessa fase do estudo, foram considerados os seguintes aspectos: a localização de outras unidades termelétricas, linhas de transmissão,

ferrovias, rodovias, hidrografia, áreas urbanas, proximidade de plantios florestais comerciais, produtividade esperada dos plantios e a topografia do terreno.

#### a. Distância Euclidiana

Calculou-se a distância euclidiana, i.e., em linha reta, para todas as feições de interesse (exceto inclinação do terreno e produtividade esperada), nos formatos vetorial e matricial, sendo a saída sempre um tema matricial.

#### b. Padronização das variáveis e fuzzyficação

A lógica *fuzzy* consiste em classificar os critérios em uma escala de 0 a 1, sendo os valores próximos a 0 menos favoráveis e, os próximos a 1, os mais favoráveis à proposta (LEWIS et al., 2015). As funções de pertinência foram ajustadas de forma a descreverem, da melhor forma possível, o comportamento das variáveis estudadas e sua influência na instalação de usinas bioenergéticas.

As rodovias e ferrovias são fatores importantes para o planejamento de qualquer empreendimento florestal, já que a transporte da matéria-prima até os pátios da indústria implica maior custo de produção (PAULO et al., 2015; COSTA, 2014; MACHADO, 2014; VOETS et al., 2013; VOIVONTAS et al, 2001). A proximidade das linhas de transmissão é também fundamental para a distribuição da energia gerada para a comunidade. As áreas urbanas concentram os consumidores, ao mesmo tempo que fornecem a mão-de-obra para o funcionamento do negócio. A inclinação do terreno acentuada acarreta altos custos de instalação de indústrias, além de representar graves riscos de movimentação de terra e erosão. Segundo Ramos (2000), inclinações de terrenos maiores que 10% (~ 5,7°) são extremamente indesejáveis em locais destinados à construção de uma indústria.

As variáveis linhas de transmissão, ferrovias, rodovias, hidrografia, áreas urbanas e inclinação do terreno foram ajustadas pela função sigmoide decrescente (*Small*), em que os menores valores do tema matricial assumiram grau de pertinência 1 e o ponto médio, definido pelo analista, assumiu o grau de pertinência 0,5, definindo-se, assim, a forma e a característica da curva da função. Os valores do plano de informação maiores que o do ponto médio têm menores chances de serem aptos no modelo. Definiu-se a função *Small* da seguinte forma:  $\mu_A(x) = \left\{ \frac{1}{1 + (x/c)^b} \right\}$ , sendo  $x$  o valor da distância Euclidiana (metros),  $b$  o parâmetro que determina a inclinação da curva e  $c$  o valor associado ao ponto médio de cada uma das variáveis.

A fim de se evitar a aglomeração de usinas e a competitividade por um mesmo produto e ainda tornar a distribuição da energia no estado mais homogênea, considerou-se que, quanto mais distante de outras usinas termelétricas, mais adequada seria a localização de uma nova usina. O ajuste dessa variável foi feito pela função de pertinência linear crescente, em que a maior distância euclidiana corresponde ao maior grau de pertinência. Assim  $\min \mu_A(x) = 0$  e  $\max \mu_A(x) = 1$  para  $x \in U$ .

Pensando na garantia do suprimento da matéria-prima, a análise da proximidade dos plantios comerciais de eucalipto é essencial. Para essa variável aplicou-se a função de pertinência linear decrescente, em que a menor distância Euclidiana corresponde ao maior grau de pertinência no conjunto *fuzzy*. Em outras palavras, o valor mínimo do modelo possui grau de pertinência 1 ( $\min \mu_A(x) = 1$ ) e o valor máximo, possui grau de pertinência 0 ( $\max \mu_A(x) = 0$ ) para  $x \in U$ . Segundo Bain et al. (2003), distâncias maiores que 80 km se tornam restritivas para o transporte de madeira para indústrias florestais. No caso da variável plantios comerciais, foi considerado um valor máximo de 80.000 m, atribuindo, assim, grau de pertinência 0 para valores maiores que este limite.

Já a produtividade estimada apresenta comportamento sigmoidal crescente (*Large*), em que os valores de Incremento Médio Anual (IMA) esperado maiores que um dado ponto médio correspondem ao maior grau de pertinência no conjunto *fuzzy* ( $\max \mu_A(x) = 1$  para  $x \in U$ ). A função *Large* é dada por  $\mu_A(x) = \left\{ \frac{1}{1 + (x/c)^{-b}} \right\}$ , em que  $x$  é o valor da produtividade média esperada ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) na imagem matricial;  $b$  é o parâmetro que determina a inclinação da curva e  $c$  corresponde ao valor no ponto médio que define o ponto central para a função em que  $\mu_A(x) = 0,5$ . Considerando-se que a produtividade média em Minas Gerais é de  $39 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  (IBÁ, 2015; BRACELPA, 2011), o ponto médio para essa variável foi igual a 40, ou seja, IMA maior que  $40 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  é altamente desejável.

Os pontos mínimos, médios e máximos aplicados às variáveis ajustadas pelas funções Sigmoidal e Linear foram definidos com base na literatura e estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Relação de pontos médio, máximo e mínimo estabelecidos para as funções *Small*, *Large* e *Linear*.

Variável	Ponto Mínimo	Ponto Máximo	Ponto Médio	Função	Fonte
Ferrovias	30 m	342.610 m	5.000 m	<i>Small</i>	Koikai (2008)
Rodovias	30 m	47.116,1 m	3.200 m	<i>Small</i>	Koikai (2008)
Linhas de Transmissão	30 m	279.606 m	1.600 m	<i>Small</i>	Apawootichai (2001) e Koikai (2008)
Termelétricas	0 m	522.318 m	-	Linear crescente	-
Hidrografia	200 m	28.230,3 m	5.000 m	<i>Small</i>	Apawootichai (2001) e Koikai (2008)
Áreas Urbanas	1.000 m	78.760,8 m	5.000 m	<i>Small</i>	Apawootichai (2001)
Plantios Comerciais	80.000 m	0 m	-	Linear decrescente	-
Produtividade esperada (6 anos)	<20 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	>60 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	40 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	<i>Large</i>	IBÁ (2015) e Bracelipa (2011)
Inclinação do terreno	0 °	15 °	5,7 °	<i>Small</i>	Ramos (2000)

### c. Integração das Variáveis - *Fuzzy overlay*

Após a exclusão das áreas impróprias para a instalação de indústrias bioenergéticas, os planos de informação fuzzyficados foram sobrepostos e reunidos em um único conjunto pelo operador *Gamma*, que associa o efeito crescente do operador *Sum* e o decrescente do operador *Product* (LEWIS et al. 2015). A operação é descrita pela equação  $\mu_A(x) = \left\{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)\right\}^\delta \times \left\{\prod_{i=1}^n \mu_i\right\}^{1-\delta}$ , em que  $\mu_i$  é o valor de associação *fuzzy* para  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  corresponde ao plano de informações raster, ou seja, ao número de variáveis no estudo, e  $\delta$  é um coeficiente com valores entre 0 e 1.

O plano de informações resultante da sobreposição das variáveis (operação de *overlay*) foi então reclassificado em áreas impróprias, ruins, regulares, boas e excelentes, empregando-se o método *Natural breaks (Jenks)*. As áreas contíguas de aptidão excelente superiores a 50.000 m<sup>2</sup> (cerca de 55 células) foram selecionadas, exportadas para o formato vetorial e agregadas quando em uma distância menor que 2.500 m. A partir desses polígonos, foram gerados os respectivos centroides, que representam os locais potenciais para a instalação das usinas bioenergéticas.

A aptidão para usinas energéticas de biomassa florestal por município foi obtida a partir da interseção entre o mapa final vetorizado e o tema de municípios mineiros.

Em seguida, organizaram-se os municípios com o maior somatório de áreas de aptidão excelente.

### **Locais ideais para instalação de usinas bioenergéticas**

A localização ideal de usinas bioenergéticas é obtida pela determinação de  $p$  facilidades de seus  $n$  pontos de oferta. Desse modo, a soma das distâncias entre os pontos de oferta de biomassa florestal ( $n$ ) e as usinas ( $p$ ) deve ser mínima. Para a estruturação das bases de dados utilizaram-se os recursos da caixa de ferramentas Data Management Tools e, para o desenvolvimento das análises espaciais, as extensões *Network Analyst* e *Spatial Analyst*.

Lançou-se mão das informações acerca dos pontos candidatos à instalação de usinas bioenergéticas, dos plantios comerciais de eucalipto, da produtividade esperada de eucaliptos e das rodovias do estado.

Obteve-se a produtividade média esperada de cada polígono representativo dos plantios comerciais, utilizando-se a ferramenta *Zonal Statistic* da caixa de ferramentas *Zonal* da extensão *Spatial Analyst*. Para o cálculo da oferta de madeira, o valor de produtividade média esperada foi multiplicado pela área de cada uma dessas feições. Foram gerados pontos representativos da produção de madeira em cada polígono de área contígua de florestas, de modo que cada ponto de demanda representasse a produção de 5.000 m<sup>3</sup>. Assim, um maciço florestal ou talhão que tenha produção de 10.000 m<sup>3</sup> de madeira, por exemplo, terá 2 pontos representativos da produção de 5.000 m<sup>3</sup> cada. Nessa etapa de discretização, utilizou-se o software hMETIS (KARYPIS e KUMAR, 1998) para que esses pontos fossem mais bem distribuídos nas feições de plantios comerciais (Anexo 1). O algoritmo implementado resolve problemas de particionamento, ou seja, divide os itens de um conjunto em subconjuntos menores, de modo que o custo seja o menor possível. No caso do problema da discretização da produção florestal esperada, os conjuntos são os polígonos de áreas contíguas de florestas e os subconjuntos são as áreas representativas da produção de 5.000 m<sup>3</sup> de madeira. Os subconjuntos representam produções (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) semelhantes, o que não implica que seus tamanhos sejam iguais. Os pontos representativos dessa produção foram obtidos pela extração dos centroides dos subconjuntos (Figura 4).

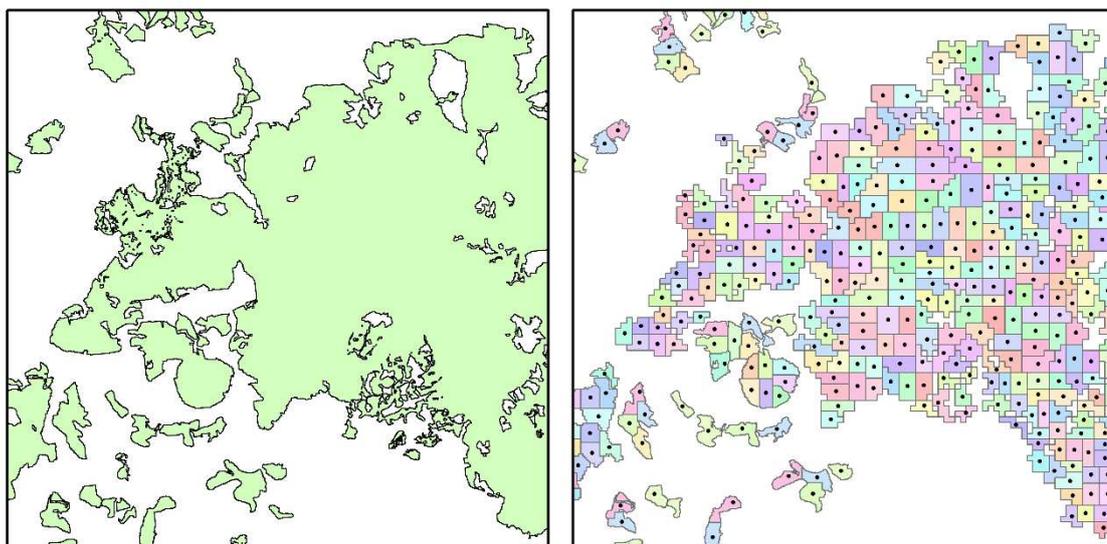


Figura 4: Discretização dos plantios de eucaliptos em subconjuntos de produção de 5.000 m<sup>3</sup> de madeira.

O problema de localização-alocação foi resolvido adotando-se a função *Maximize Capacitated Coverage*, onde a rede (*Network dataset*) tem os arcos (Rodovias) orientados no sentido das demandas (pontos representativos da produção) até a facilidade mais próxima (centroides das áreas candidatas). O algoritmo permite estabelecer a capacidade máxima de recebimento de suprimentos de um número fixo de pontos candidatos e calcular a melhor opção dentre eles, tal que a soma dos custos de entrega entre as usinas e os pontos de demanda seja minimizada (ESRI - *Environmental Systems Research Institute*).

Assumiu-se que apenas 50% da produção total de madeira de eucalipto de Minas Gerais estaria disponível para produção de bioenergia, levando-se em consideração as demais demandas para este insumo. Primeiramente, foi simulada a localização de 1 usina com capacidade de recebimento de 25.000.000 m<sup>3</sup> de madeira. Em outras palavras, essa única usina terá a capacidade de recebimento de suprimentos de 5.000 pontos de demanda com disponibilidade de 5.000m<sup>3</sup> de madeira cada um.

A conversão de estoque de biomassa para potencial de energia termelétrica foi realizada por meio da seguinte equação (7), adaptada de CENBIO (2009):

$$Potencial (MW) = \frac{\left[ (m^3 \text{ madeira} * 0,68) * PCI \frac{kcal}{kg} * 0,33 \right]}{860 * 8,322 / \text{ano}} \quad (7)$$

Foi necessária a conversão da unidade de volume de madeira para tonelada, sendo 1 m<sup>3</sup> igual a 0,68 t de madeira em tora. O Poder Calorífico Inferior (PCI) utilizado foi de 2.000 kcal/kg. A eficiência de conversão da madeira em energia

termelétrica foi considerada como sendo 33% (CARNEIRO e OLIVEIRA, 2013; GOLDEMBERG, 2009) e o fator de conversão de kcal/kg para kWh/kg 860 (COELHO et al., 2000).

Foram simulados os seguintes cenários:

- 1- Única (1) usina com capacidade de geração de 1.567,71 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 25.000.000 m<sup>3</sup> de madeira;
- 2- Duas (2) usinas com capacidade de geração de 783,85 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 12.500.000 m<sup>3</sup> de madeira cada;
- 3- Três (3) usinas com capacidade de geração de 522,57 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 8.333.000 m<sup>3</sup> de madeira;
- 4- Quatro (4) usinas com capacidade de geração de 391,93 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 6.250.000 m<sup>3</sup> de madeira;
- 5- Cinco (5) usinas capacidade de geração de 313,54 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 5.000.000 m<sup>3</sup> de madeira;
- 6- Dez (10) usinas capacidade de geração de 1567,71 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 2.500.000 m<sup>3</sup> de madeira;
- 7- Quinze (15) usinas capacidade de geração de 104,52 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 1.666.000 m<sup>3</sup> de madeira;
- 8- Vinte (20) usinas capacidade de geração de 78,39 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 1.250.000 m<sup>3</sup> de madeira;
- 9- Vinte e Cinco (25) usinas capacidade de geração de 62,70 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 1.000.000 m<sup>3</sup> de madeira.
- 10- Trinta (30) usinas capacidade de geração de 52,25 MW/ano, equivalendo a uma capacidade de recebimento de 833.333,33 m<sup>3</sup> de madeira.

As distâncias médias para cada um dos cenários foram computadas em gráficos e comparadas para que se identificar a melhor opção quanto ao número de usinas bioenergéticas.

### Fluxograma geral da metodologia

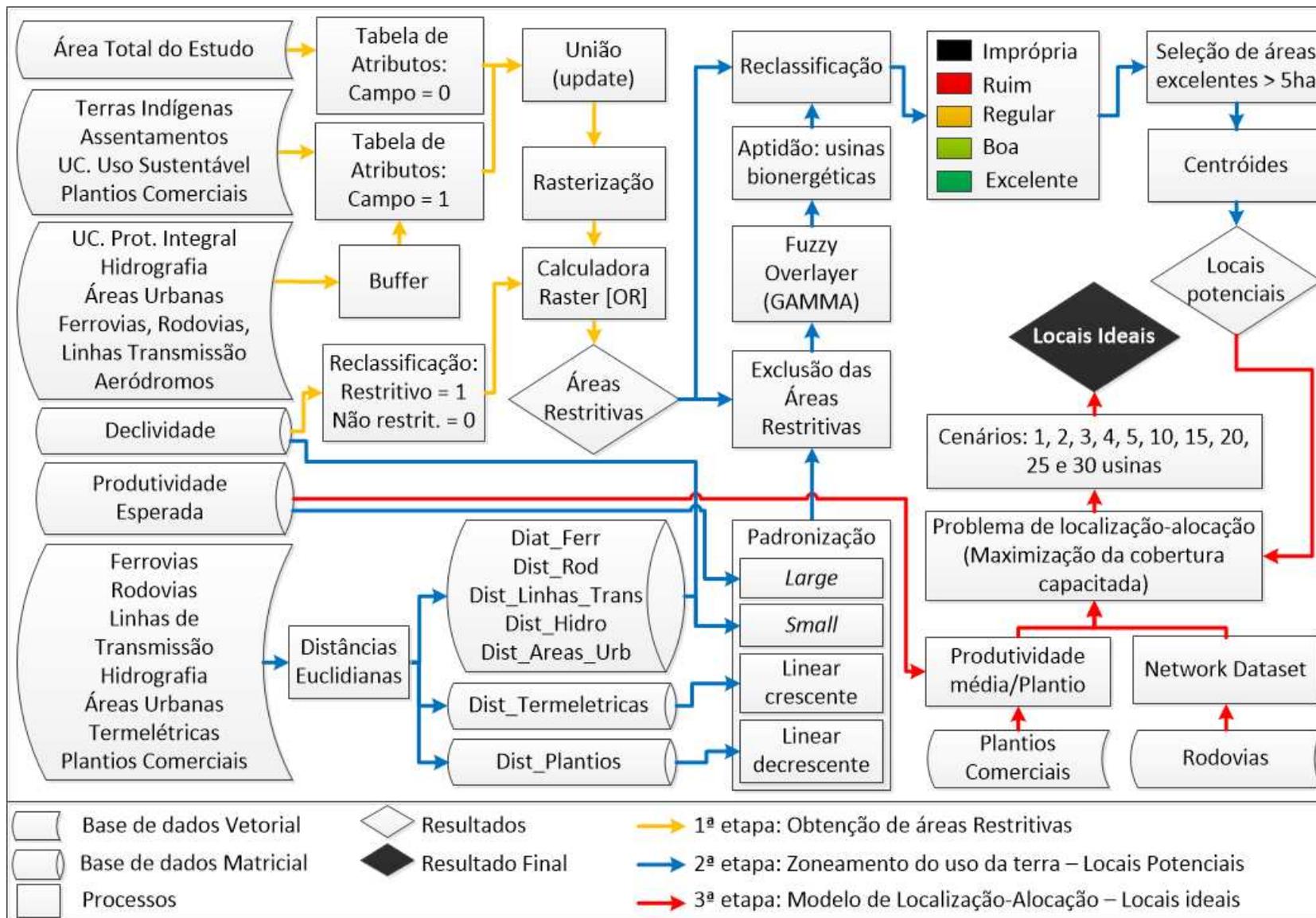


Figura 5: Fluxograma geral da metodologia

## Resultados e Discussão

Em uma área de estudo, nem todos os locais podem ser considerados próprios para a instalação de um empreendimento. A exclusão dessas áreas deve anteceder a escolha de locais potenciais, para otimizar o tempo de processamento e evitar resultados inapropriados (KUHMAIER et al., 2014; SULTANA e KUMAR, 2012; CHANG et al., 2008; DONG, 2008; RAMOS, 2000). As áreas restritivas foram excluídas do modelo com base em restrições absolutas, determinadas por legislação vigente ou, ainda, por fatores ambientais, sociais, biofísicos ou de infraestrutura, que inviabilizam a instalação de usinas bioenergéticas.

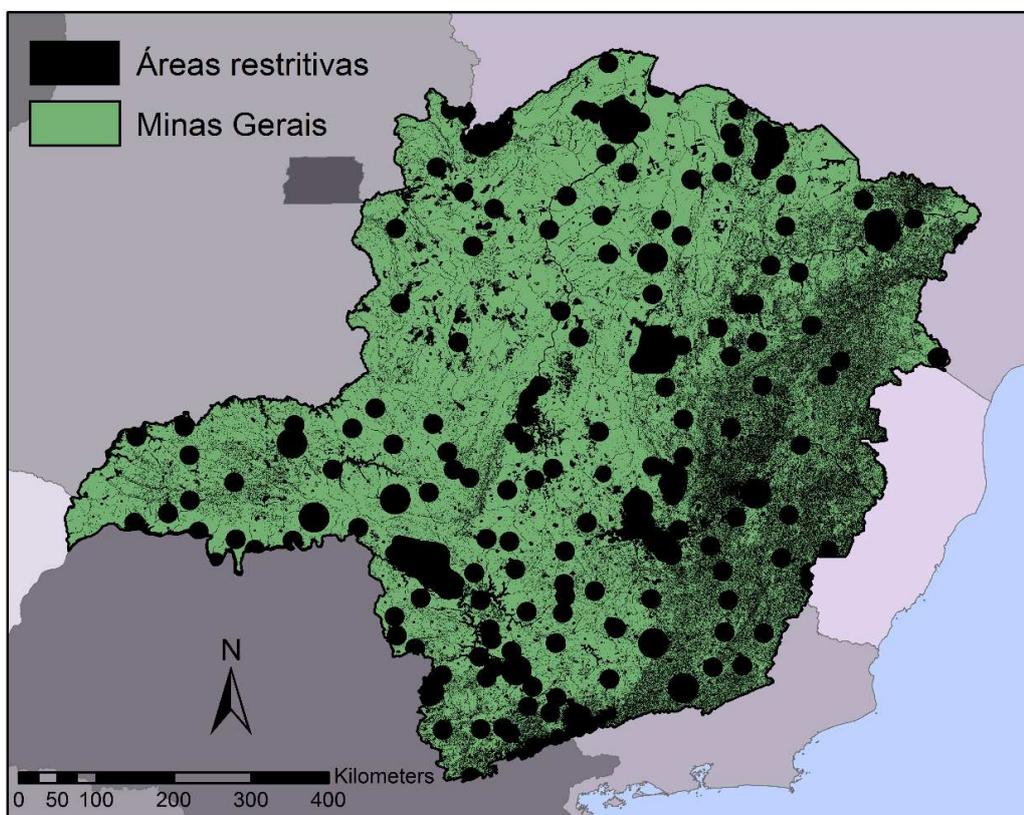


Figura 6: Áreas restritivas para a instalação de usinas bioenergéticas de biomassa florestal em Minas Gerais.

Cerca de 40% do território mineiro apresenta-se restritivo à instalação de usinas bioenergéticas a biomassa florestal, sendo que a presença de aeródromos e a inclinação do terreno acentuada do estado representaram a maior contribuição de áreas excludentes, somando 30,55% da área total (Tabela 4). As restrições associadas às ferrovias, linhas de transmissão, terras indígenas, rodovias e veredas apresentaram menores contribuições relativas às demais áreas de exclusão, representando individualmente menos de 1% de todo o estado. O somatório das áreas de todas as

restrições totaliza 272.769,96 mil km<sup>2</sup>, entretanto, há uma sobreposição de mais de 40.363,00 km<sup>2</sup> entre classes distintas. O valor total de exclusão corrobora os resultados de Costa (2014), que encontrou 49,7% de áreas impróprias para a produção de energia sucroalcooleira no Triângulo Mineiro, e de Lovett et al. (2009), que excluíram 59,6% de terras inglesas do modelo de aptidão para energia da biomassa.

Tabela 4: Proporção de áreas restritivas por tema no estado de Minas Gerais.

<b>Tema</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Terras Indígenas	722,46	0,12
Unidade de Conservação de Proteção Integral	23.254,66	3,96
Unidade de Conservação de Uso Sustentável (APA + RPPN)	5.970,44	1,02
Hidrografia	22.369,05	3,81
Veredas	4.060,35	0,69
Inclinação do terreno	99150,443	16,90
Plantios comerciais	12.672,27	2,16
Áreas urbanas	13.806,45	2,35
Assentamentos	8.010,56	1,37
Ferrovias	255,87	0,04
Rodovias	2.066,46	0,35
Linhas de transmissão	352,72	0,06
Aeródromos	80.078,23	13,65
Somatório de áreas restritivas	272.769,96	46,51
Total efetivo de áreas restritivas	232.406,95	39,62
Sobreposições	40.363,00	6,88
Área total da área de estudo	586.523,50	100,00

As maiores distâncias euclidianas foram obtidas para as variáveis Termelétricas (522.318 m), ferrovias (342.610 m) e linhas de transmissão (279.606 m), confirmando a escassez dessas infraestruturas em Minas Gerais (Figura 7). Por outro lado, observam-se pequenas distâncias euclidianas entre as feições de hidrografia (28.230,30 m) e de malha viária (47.116,10 m), indicando uma boa disponibilidade desses recursos no estado. A Figura 7 mostra ainda a boa distribuição espacial dos plantios comerciais na área de estudo. Os cursos d'água representam áreas ambientalmente sensíveis e necessitam de atenção quanto às legislações ambientais (DONG, 2008). Já a acessibilidade e a disponibilidade de matéria-prima são consideradas fatores essenciais para a instalação de indústrias para a produção bioenergética (KUHMAIER et al., 2014, WU et al., 2011; RAMOS, 2000; SULTANA e KUMAR, 2012). O estado de Minas Gerais se mostra, portanto, altamente promissor para a produção de energia a partir da biomassa florestal.

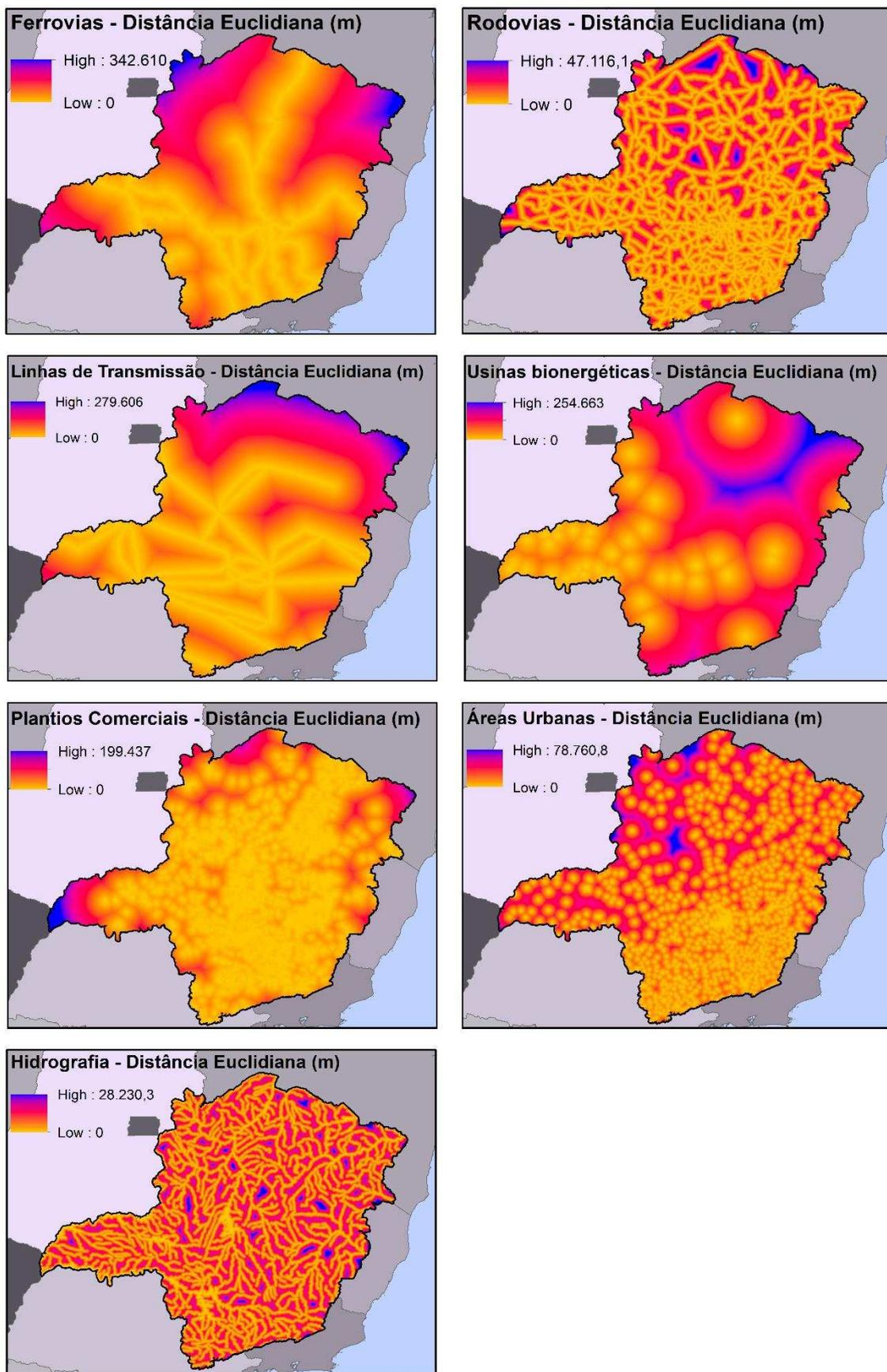


Figura 7: Distâncias euclidianas para as variáveis Ferrovias, Rodovias, Linhas de Transmissão, Termelétricas, Plantios comerciais, Áreas Urbanas e Hidrografia.

As funções de pertinência ajustadas, bem como os resultados da padronização para cada uma das variáveis envolvidas no estudo, estão representados nas Figura 8 e Figura 9. Na Figura 10 observa-se a frequência das células em cada classe *fuzzy* (0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; 0,8-1,0) após a fuzzyficação das variáveis estudadas. Há uma baixa frequência de células nas classes *fuzzy* intermediárias (0,2-0,8) nas ferrovias, rodovias, linhas de transmissão e áreas urbanas. (Figura 10). Já a hidrologia, os plantios comerciais e a inclinação do terreno apresentaram maior frequência de pixels com classificação entre 0,8 e 1,0, influenciando positivamente na alta aptidão das áreas (Figura 9 e Figura 10).

A maioria dos pixels das variáveis ferrovias e linhas de transmissão recebeu classificação entre 0,0 e 0,2 (> 93% e 95%, respectivamente), exercendo grande influência na baixa aptidão para a instalação das usinas (Figura 10). As áreas de baixa aptidão são justificadas pelos pontos médios das variáveis localizados a pequenas distâncias, além da existência de muitas áreas não atendidas por elas (Figura 8). As variáveis linhas de transmissão e ferrovias apresentaram alta aptidão até os pontos médios de 5.000 m e 1.600 m; porém, apresentaram baixa aptidão a partir desses pontos até distâncias maiores que 300 mil e 200 mil metros, respectivamente (Figura 8). Por outro lado, as variáveis hidrografia e áreas urbanas possuem o mesmo valor de ponto médio das ferrovias (5.000 m) e apresentaram-se mais flexíveis por terem menores distâncias entre suas feições (Figura 8). O mesmo raciocínio pode ser aplicado às rodovias que, mesmo tendo ponto médio de apenas 3.200 m, ainda assim apresentaram maior flexibilidade em relação às ferrovias, graças à melhor distribuição da malha viária e, conseqüentemente, melhor alcance de serviço (Figura 9).

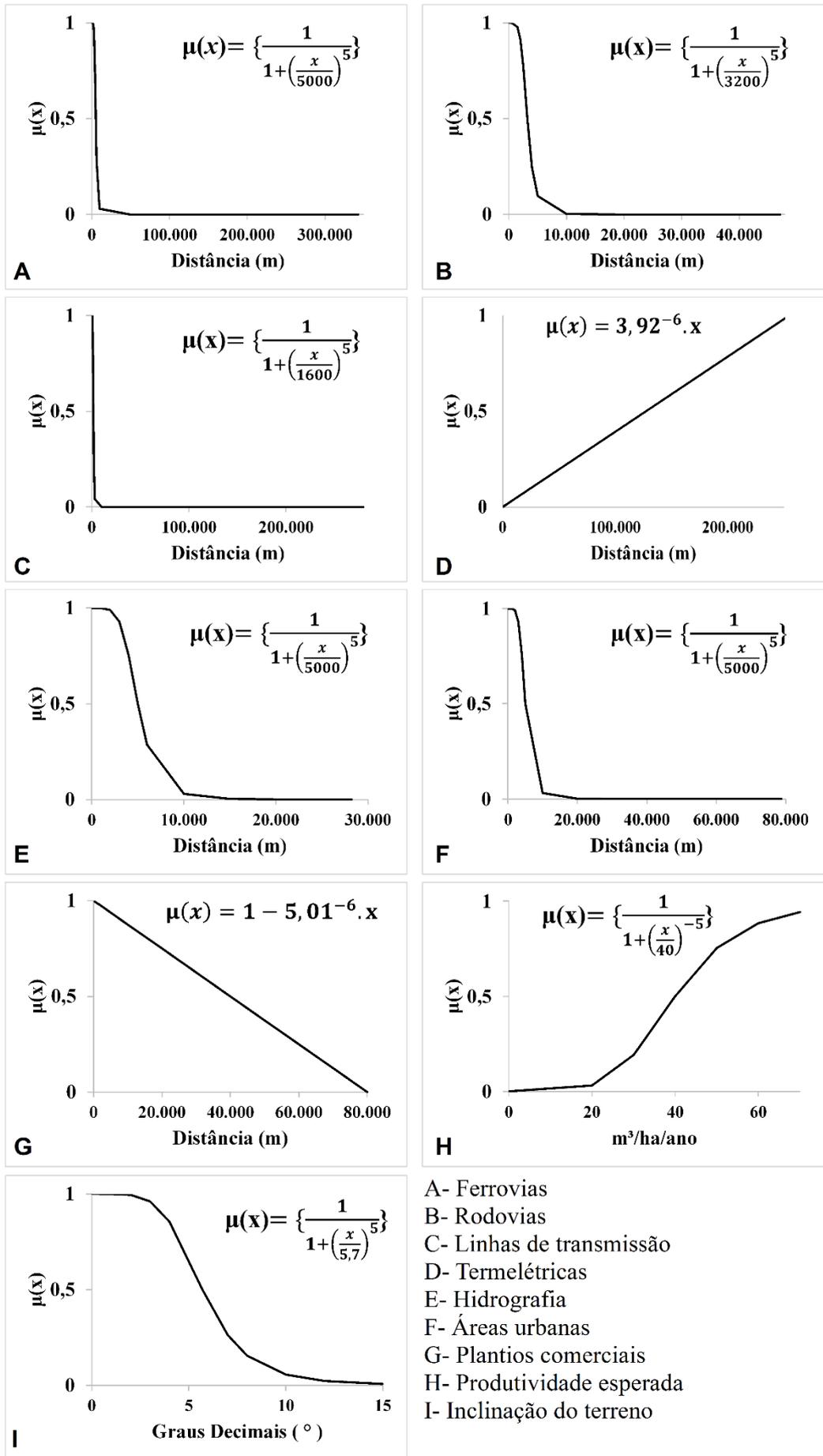


Figura 8: Funções de Pertinência aplicadas às variáveis do modelo.

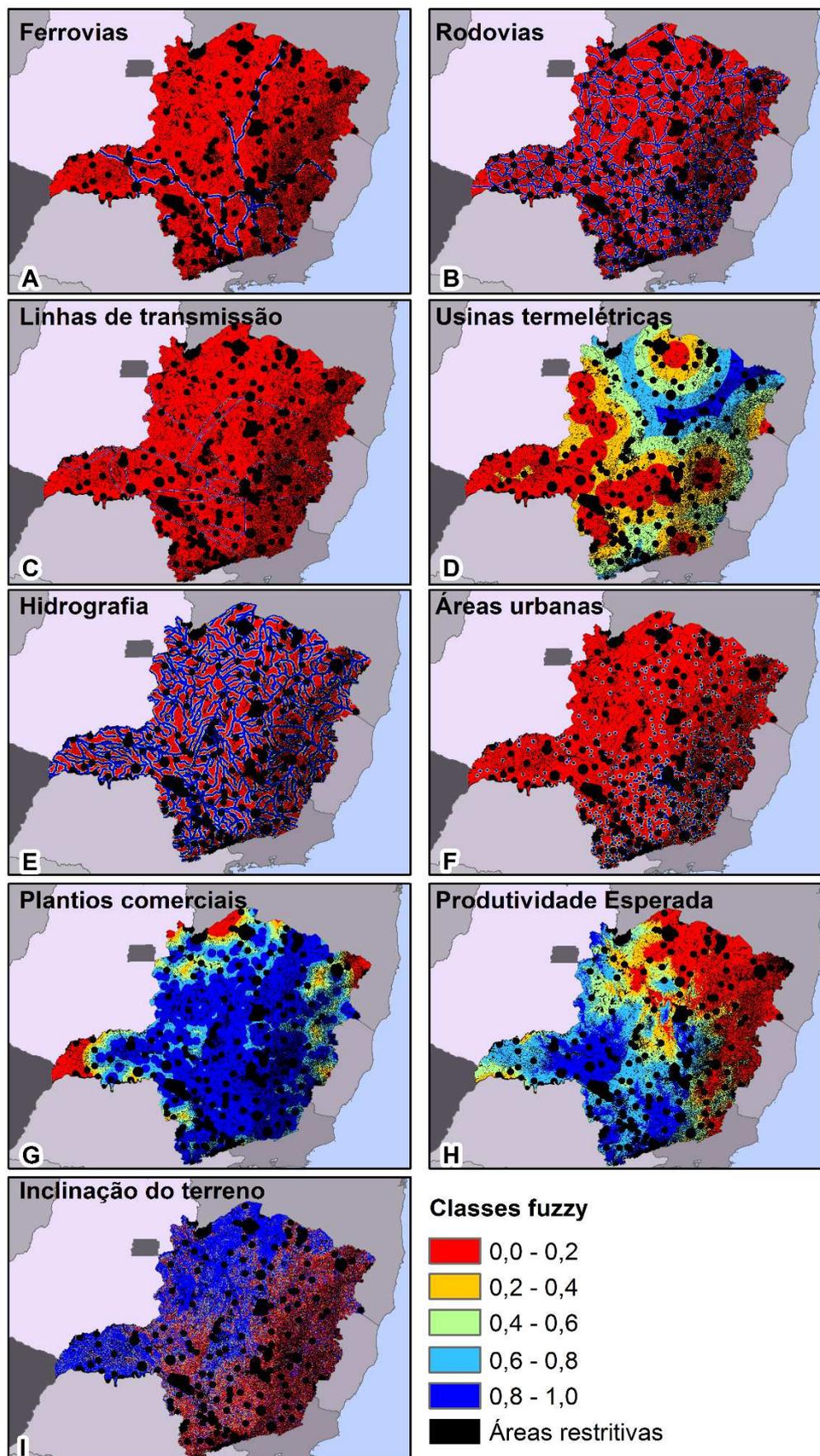


Figura 9: Efeito das funções de pertinência sobre as variáveis.  
 A- Ferrovias; B- Rodovias; C- Linhas de transmissão; D- Termelétricas; E- Hidrografia;  
 F- Áreas urbanas; G- Plantios comerciais; H- Produtividade esperada do eucalipto; I-  
 Inclinação do terreno.

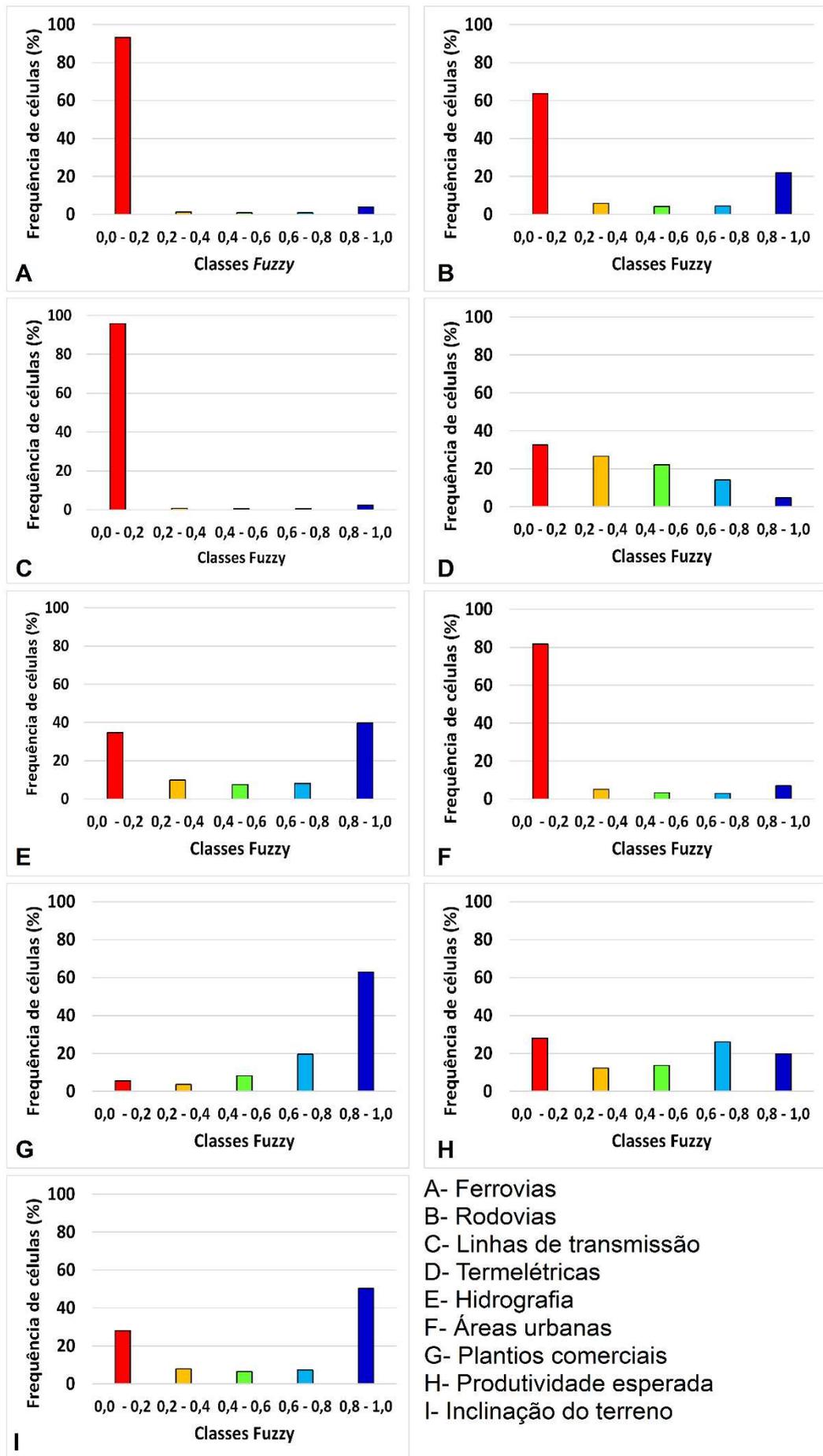


Figura 10: Frequência de pixels em cada classe *fuzzy*.

O índice de aptidão do modelo variou de 0 a 0,88 (Figura 11), com média de 0,038 e desvio padrão igual a 0,06. Não há áreas totalmente aptas, ou seja, não há locais que atendam a todas as variáveis simultaneamente. Em um modelo de conjuntos *fuzzy*, o índice de aptidão é resultado do efeito compensatório entre valores menos “aceitáveis” de uma variável e valores mais “aceitáveis” de outra (MALCZEWSKI, 2004; SILVERT, 2000).

Segundo o modelo de aptidão aplicado, 44,10% do estado apresenta áreas ruins para a instalação de usinas bioenergéticas, sendo essa baixa aptidão influenciada principalmente pelas variáveis ferrovias e linhas de transmissão. Essas áreas se concentram nas regiões Noroeste, Jequitinhonha, Rio Doce e Zona da Mata. Segundo a ANEEL (2008), o Brasil ainda não consegue atender à demanda energética da totalidade da sua população, principalmente quando se fala em comunidades rurais ou isoladas e de difícil acesso. No estado de Minas Gerais, essas comunidades se concentram justamente nas regiões Norte, Vale do Jequitinhonha e Mucuri. A deficiência no atendimento da demanda de energia está diretamente relacionada às restrições físicas ou econômicas para extensão da rede elétrica. As dificuldades de disponibilização da energia aumentam à medida em que aumenta o número de habitantes com baixo poder aquisitivo e diminui a densidade demográfica (HERRAN e NAKATA, 2011; ANEEL, 2008). Vale a pena repensar a rede de distribuição de energia do estado, de modo a ampliar a distribuição de energia e ainda possibilitar a produção energética em outras regiões, principalmente naquelas mais pobres e com menor densidade demográfica. Ainda que a malha rodoviária seja bem distribuída, pena é estratégico investir no transporte ferroviário para tornar a logística de produção e distribuição da matéria-prima florestal mais eficiente, barata e segura.

As áreas boas e excelentes somaram 3,90% da área de estudo (Figura 12). Dos 853 municípios mineiros, 127 apresentaram áreas excelentes para a construção do empreendimento. A hierarquização dos municípios com maior somatório de áreas excelentes e a porcentagem de área de cada classe de aptidão são apresentadas no Anexo 2. Os municípios de Brumadinho, Bom Sucesso, Madre de Deus de Minas, Carmo da Cachoeira e São João Del Rei, localizados no sul de Minas e na região de Campos das Vertentes, apresentaram as maiores áreas absolutas de zonas de excelentes. Mais da metade do território de São Brás do Suaçuí e Mário Campos corresponde a áreas excelentes para a instalação de indústrias bioenergéticas, enquanto que Minduri,

São Joaquim de Bicas e Ribeirão Vermelho apresentam mais de 40% de áreas com essa aptidão.

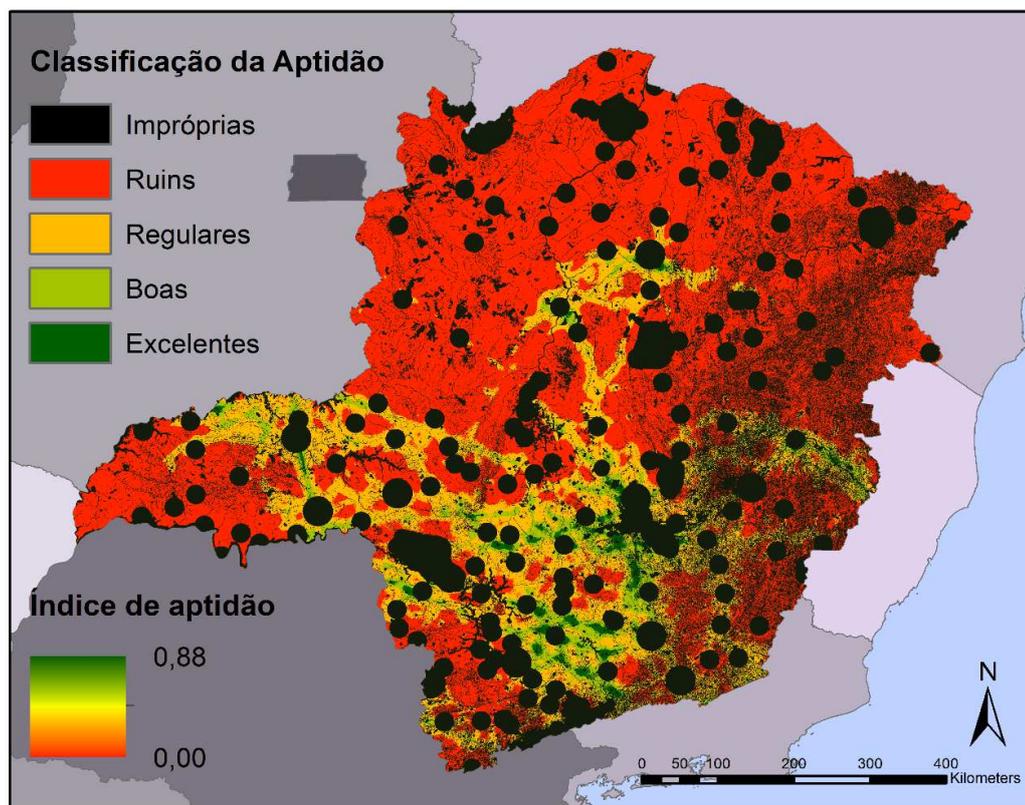


Figura 11: Índice de aptidão para a instalação de usinas energéticas a biomassa florestal no estado de Minas Gerais.

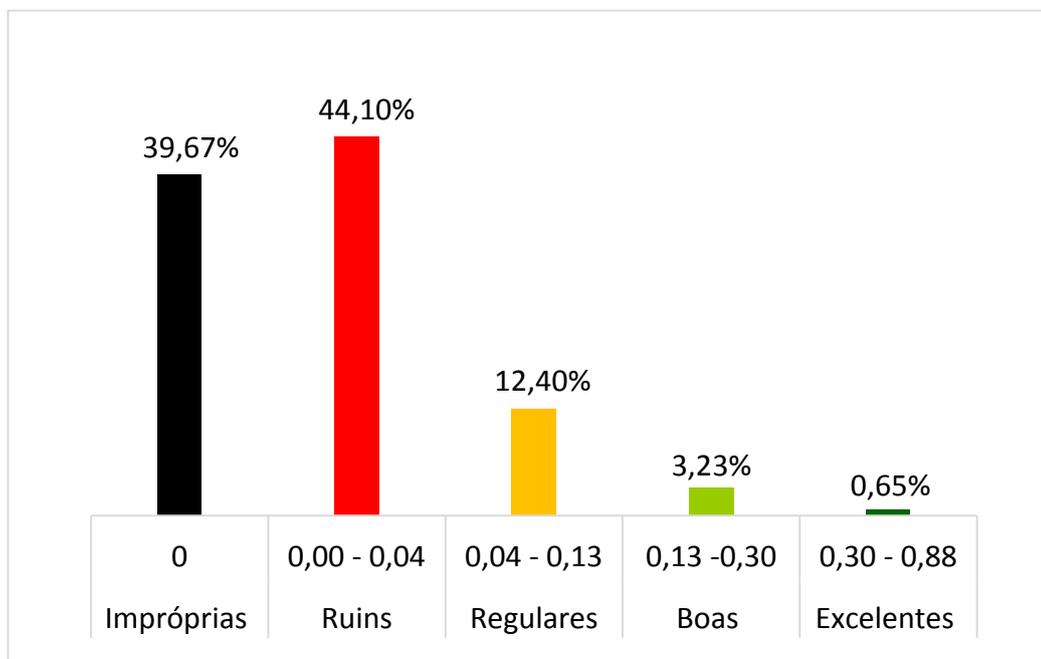


Figura 12: Porcentagem de área para cada classe de aptidão para a instalação de usinas a biomassa florestal no estado de Minas Gerais.

A seleção de áreas excelentes contíguas maiores que 50.000 m<sup>2</sup> é importante para que haja a possibilidade de expansão das indústrias (CHEALI et al., 2015). Obtiveram-se 47 pontos candidatos à instalação de usinas termelétricas, sendo que a localização das usinas candidatas está fortemente ligada às ferrovias e linhas de transmissão (Figura 13).

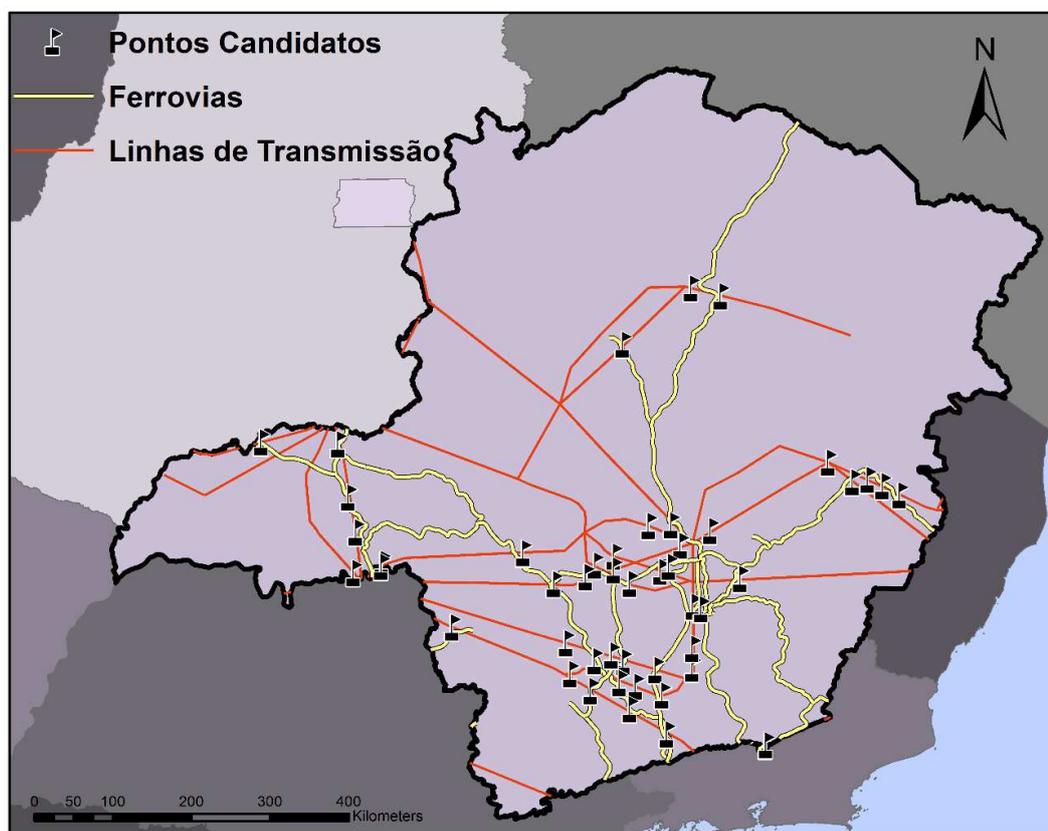


Figura 13: Pontos candidatos à instalação de usinas bioenergéticas em Minas Gerais.

Reconhecendo-se a grande extensão de áreas do estado e as diferenças sazonais entre as regiões estudadas, foi necessário contemplar as variações de produtividade do eucalipto ao longo da área de estudo. Devido à escassez de dados acerca da produtividade desta cultura em todo o estado de Minas Gerais, lançou-se mão da sua estimativa pelo Modelo 3-PG. O modelo 3-PG, acrônimo de *Physiological Principles in Predicting Growth*, possibilita a estimativa da produtividade em função dos fatores ambientais que influenciam o crescimento de espécies florestais (BORGES, 2012). É uma maneira simples de se estimar a variação da produtividade, requerendo dados de fácil acesso. Amichev et al. (2010) enfatizam a importância da predição do crescimento de espécies florestais em função de variáveis edafoclimáticas e das características do solo para o planejamento dos diferentes usos da madeira, inclusive para a geração de energia.

Após o cruzamento das informações da produtividade com os dados de plantios comerciais, foram gerados 9.663 pontos de demanda. Se cada ponto representa a produção de 5.000 m<sup>3</sup> de madeira, o estudo indica que o estoque é de quase 48,4 milhões de m<sup>3</sup> de madeira aos 6 anos de idade. Segundo o IBGE (2015), em 2014 houve uma produção de aproximadamente 50 milhões de m<sup>3</sup> de madeira para os diversos fins\*, indicando um excelente resultado da estimativa da produção. Vale lembrar que, nesse estudo, foi considerada a mesma idade (idade de corte) para todos os povoamentos; logo, o valor usado é apenas um valor aproximativo do estoque de madeira no estado.

Nem toda a produção florestal pode ser destinada à geração de energia, pois há outros usos que competem por essa matéria-prima (DONG, 2008). Por isso, foram simulados vários cenários para a instalação de usinas bioenergéticas, considerando-se apenas metade do estoque estimado.

Em um cenário de instalação de uma única usina haveria alto deslocamento médio (19.391,62 km) para suprir a demanda necessária para a produção de 1.567,71 MW/ano (Figura 14). Khachatryan et al. (2010) e Kumar et al. (2003) também afirmam que, quanto maior a capacidade da indústria, maiores são as distâncias de busca de matéria-prima e maiores os custos de produção. Se cerca de 30% dos custos da produção da energia da biomassa advêm do transporte da matéria-prima (SULTANA e KUMAR, 2002), as longas distâncias implicam alto custo de transporte da matéria-prima até a fábrica e, conseqüentemente, altos custos de produção (PAULO et al., 2015; COSTA, 2014; MACHADO, 2014; VOETS et al., 2013; VOIVONTAS et al, 2001).

A instalação de uma única usina na região de Sete Lagoas (Figura 15), com capacidade para a produção de 1.567,71 MW/ano, torna-se uma opção pouco atrativa também pelos altos custos de implantação de uma megaindústria (COSTA, 2014). Segundo Paulo et al. (2015), os custos de implantação de usinas bioenergéticas aumentam à medida em que se aumenta a capacidade de produção. Os custos iniciais de implantação, todavia, podem ser compensados pelos altos lucros da produção em larga escala, principalmente quando há investimento em altas tecnologias (SONG et al., 2015; VAN EIJCK et al., 2014).

\*Valor referente ao somatório da produção de carvão vegetal, lenha, madeira em tora para papel e celulose e outras finalidades. Foi considerado que 1 t de carvão = 6m<sup>3</sup> de madeira (RAAD, 2010).

À medida em que se aumenta o número de usinas e diminui-se a capacidade de produção, há uma diminuição acentuada nas distâncias médias de busca de matéria-prima, até a instalação de 5 usinas (9.566,04 km) (Figura 14). Isso ocorre devido à melhor possibilidade de arranjo espacial das usinas de menor capacidade, em relação às ofertas de matéria-prima (ZHANG et al., 2011, HERRAN e NAKATA, 2011). A partir desse ponto, as distâncias médias se mantêm entre 9.215,13 km e 9.566,04 km até a instalação de 15 usinas. (Figura 14). A partir da instalação de 20 usinas, as distâncias médias passam a crescer, tornando as rotas de busca não otimizadas (Figura 14). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que grande parte dos pontos candidatos está concentrada na região sul da área de estudo. Dessa forma, há uma competição entre as usinas escolhidas pela busca de matéria-prima próxima e conseqüentemente, um maior deslocamento de busca. O resultado encontrado se diferencia dos estudos de Dong (2008), Sultana e Kumar (2012) e Costa (2014), em que as distâncias diminuem até certo ponto e depois têm comportamento linear decrescente com tendência a zero.

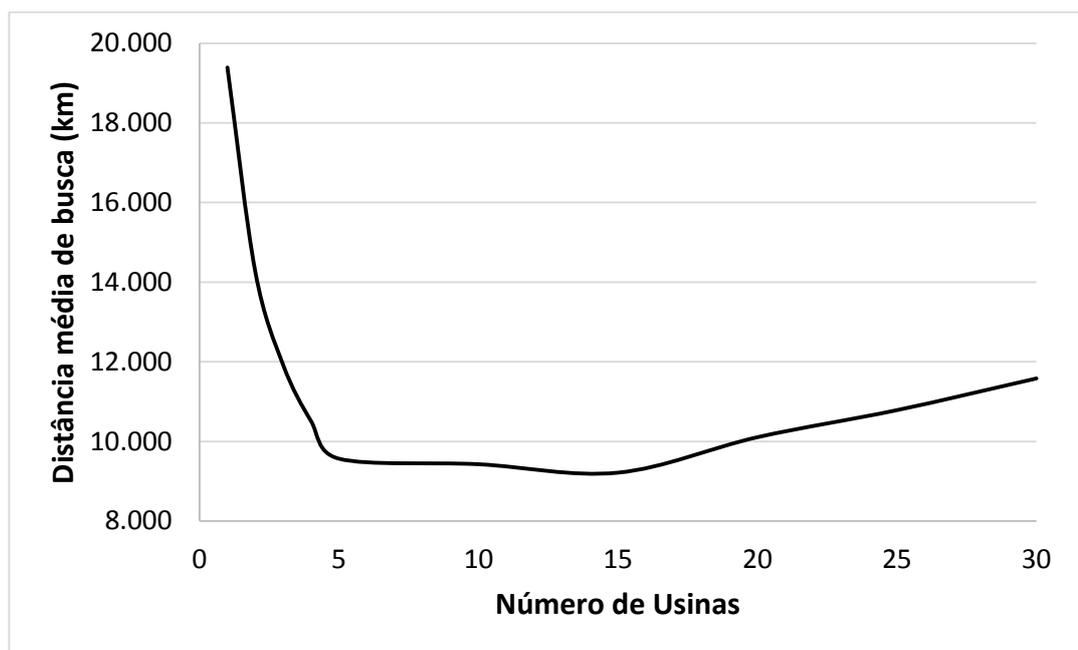


Figura 14: Distâncias médias de busca de matéria-prima para cada cenário de instalação de usinas bioenergéticas.

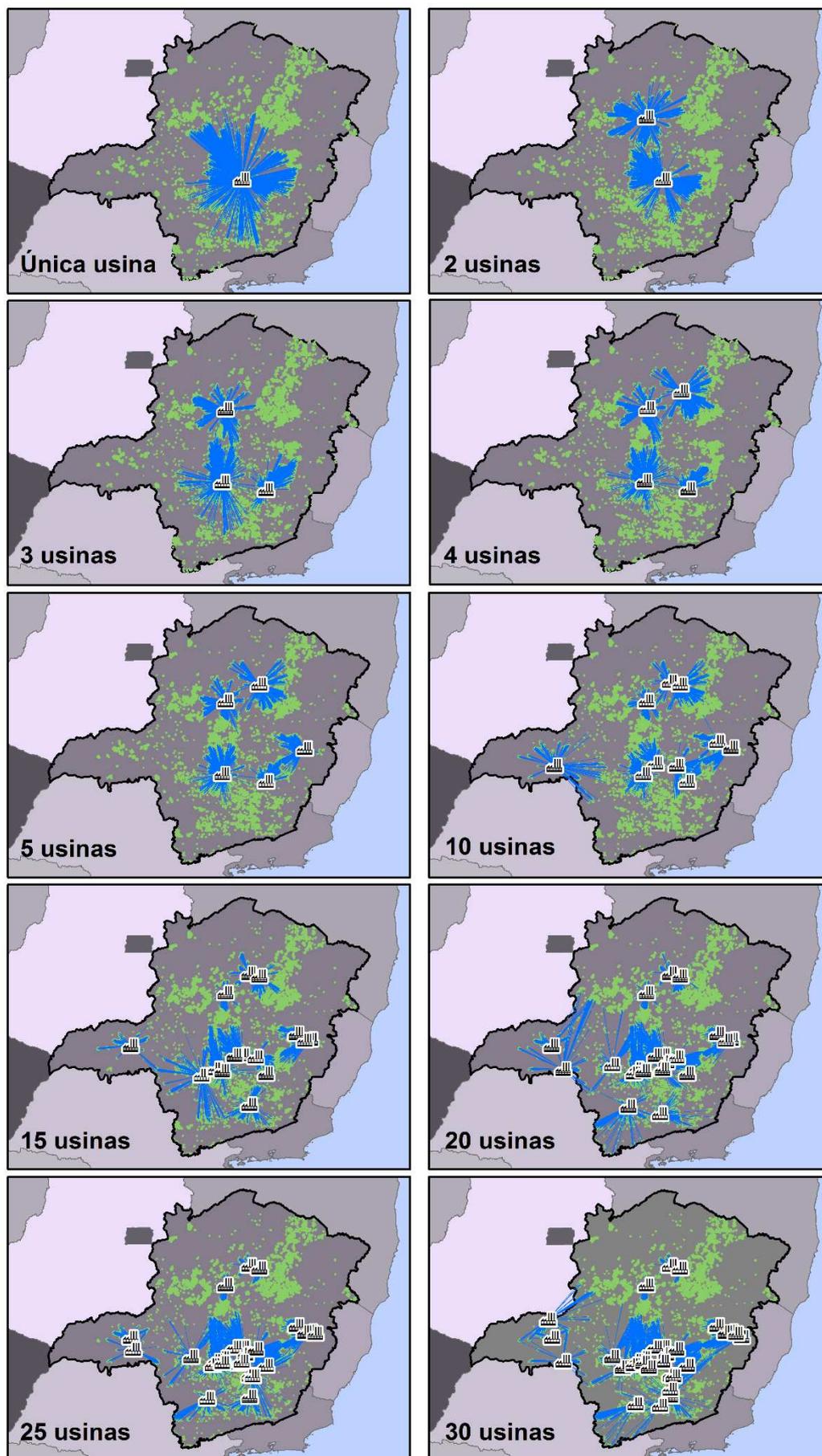


Figura 15: Localizações ideais das usinas bioenergéticas para os diferentes cenários simulados, de forma a minimizar as distâncias de busca de matéria-prima.

A escolha de implantação de várias indústrias de menor porte se justifica também pelo desenvolvimento econômico e social em nível regional. Os principais impactos positivos para a população são o elevado potencial de criação de empregos diretos e indiretos e a geração de renda (MORAES et al., 2014; MIURA et al., 2011; ANEEL, 2008). Segundo Couto et al.<sup>(1)</sup> (2004), a produção energética a partir da biomassa florestal gera empregos em uma escala 4 vezes maior do que a produção energética convencional. Além disso, há melhoria da disponibilidade de energia sustentável e barata nas regiões produtoras e seus entornos. Outro grande benefício é o incentivo e possibilidade de melhor remuneração do pequeno produtor florestal, promovendo o desenvolvimento local e rural (VAN EIJCK et al., 2014; DEMIRBAS, 2009). Segundo Herran e Nakata (2011), a descentralização da oferta de energia elétrica é essencial para o desenvolvimento de comunidades rurais e isoladas e tem sido implementada em vários países da Ásia e América Latina.

As várias indústrias bioenergéticas podem ainda estabelecer relações de colaboração no sentido de aumentar a eficiência do transporte e diminuir custos da matéria-prima. Em uma gestão colaborativa, os parceiros comerciais da cadeia de suprimentos e prestadores de serviço buscam reduzir ineficiências do processo de planejamento e otimizar o transporte (DEVLIN e TALBOT, 2013; AUDY et al., 2011). Esse novo modelo de integração torna as empresas competitivas diante de situações como o aumento do preço do combustível e do transporte a longas distâncias (CHAN e ZHANG, 2011; MILLERA, 2011). Kong et al. (2015) e Portugal-Pereira et al. (2015) destacam a importância da gestão colaborativa entre os produtores no suprimento de matéria-prima florestal e agrícola para diferentes cadeias de produção, já que os custos de logística são críticos para esse tipo de biomassa.

Apesar de o modelo aplicado levar em consideração fatores ambientais, sociais e de infraestrutura, outros fatores, como motivação política, financeira e fiscal, podem resultar na escolha de outras localidades com menor aptidão para a implantação de usinas bioenergéticas (GENUS e MAFAKHERI, 2014; MIURA et al., 2011; DORNBURG et al, 2010). De maneira geral, a produção bioenergética no Brasil ainda necessita de regulamentação do setor e de políticas que possibilitem a competitividade econômica com fontes de energia convencionais (PORTUGUAL-PEREIRA, 2015; MORAES, 2014). A partir dos resultados encontrados, podem-se desenvolver estudos mais complexos e análises econômicas mais criteriosas, necessárias à instalação de uma indústria bioenergética.

Ainda nesse contexto, há a necessidade de se desenvolver um mercado específico para a energia da biomassa florestal. Ao longo da cadeia de produção do eucalipto, por exemplo, podemos citar o mercado de lenha, carvão, polpa, celulose, etc.; porém, não existe um mercado específico para a bioenergia e nem tampouco para seus resíduos. Fica difícil então mensurar o custo de oportunidade do aproveitamento dessa fonte de energia, ou seja, é complicado avaliar o quão atrativo é o mercado energético em detrimento dos outros usos da madeira (VAN EIJCK, 2014).

## **Conclusões**

Minas Gerais apresenta uma grande porcentagem de áreas com aptidão ruim para a instalação de usinas bioenergéticas, devido à escassez de linhas de transmissão e de ferrovias.

O estado comporta de 5 a 15 usinas, de modo a melhor aproveitar os recursos florestais e minimizar as distâncias médias de busca de matéria-prima, o que é altamente desejável na produção bioenergética.

A modelagem da aptidão para os diferentes usos da terra é complexa e exige cuidadosa avaliação das diferentes características locais. O presente estudo permitiu indicar as localidades potenciais para a geração de energia a partir da biomassa florestal. A metodologia utilizada neste estudo é acessível a qualquer investidor ou entidade interessada na expansão e diversificação da matriz bioenergética e pode ser replicada para outras áreas de estudo ou adaptada para outras fontes de bioenergia.

## Referências Bibliográficas

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012. ABRAF. – Brasília: 2013.

ALAKANGAS, E. Properties of wood fuels used in Finland – BIOSOUTH Project. Jyväskylä: Technical Research Centre of Finland, 2005. 90 p.

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p.711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

AMICHEV, B. Y.; JOHNSTON, M.; REES, K. C. J. V. Hybrid poplar growth in bioenergy production systems: Biomass prediction with a simple process-based model (3PG). **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 5, p. 687-702, 2010. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.01.012.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. 2. ed. Brasília, DF: Aneel, 2005. 243 p.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília, DF: Aneel, 2008. 236 p.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informação de Geração - BIG. Brasília, DF: Aneel, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: maio de 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. SIGEL - Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>>. Acesso em julho de 2015.

APAWOOTICHAJ, S. Inclusion of environmental criteria for light industrial estate site selection in Supanburi Province. 2001. Master Degree of Philosophy in Environment. The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 2011.

ARAKAKI, R. G. I. Heurística de localização-alocação para problemas de localização de facilidades. Tese de Doutorado em Computação Aplicada. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2002.

AUDY, J. F.; D'AMOURS, S.; ROUSSEAU, L. M. Cost allocation in the establishment of a collaborative transportation agreement - an application in the furniture industry. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 6, p. 960-970, 2010. DOI:10.1057/jors.2010.53.

AYDIN, N.Y.; KENTEL, E.; DUZGUN, S. GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: a case from Western Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 14, n. 1, p. 364-373, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.023.

AYLOTT, M. J.; CASELLA, E.; FARRALL, K.; TAYLOR, G. Estimating the supply of biomass from short rotation coppice in England, given social, economic and environmental constraints to land availability. **Biofuels**. v. 1, n. 5, p. 719-727, 2010. DOI: 10.4155/bfs.10.30.

BAIN, R. L.; AMOS, W. A.; DOWNING, M.; PERLACK, R. L. Biopower technical assessment: state of the industry and the technology. NREL. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 277p. 2003.

BORGES, J. S. Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potencial de povoamentos de eucalipto. 2012. 81p. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2012.

BRACELPA - Associação Brasileira de Celulose e Papel. Relatório florestal: 2010-2011. 2011. Disponível em: <[http://bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/public/RA02-RelatorioFlorestal\\_2010.pdf](http://bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/public/RA02-RelatorioFlorestal_2010.pdf)>. Acesso em agosto de 2015.

BRAND, M. A. qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2007.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Resolução CONAMA nº 013 de 06 de dezembro de 1990. Dispõe sobre normas referentes às atividades desenvolvidas no entorno das Unidades de Conservação. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Portaria Minter Nº 124, de 20 de agosto de 1980. Estabelece normas para a localização de indústrias potencialmente poluidoras junto a coleções hídricas. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Portaria no 1.141/GM5, de 8 de dezembro de 1987. Dispõe sobre zonas de proteção e aprova o plano básico de zona de proteção de aeródromos, o plano básico de zoneamento de ruído, o plano básico de zona de proteção de helipontos e o plano de zona de proteção de auxílios à navegação aérea e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Resolução Conama, no 4, de 9 de outubro de 1995. Estabelece as Áreas de Segurança Portuária – ASAs. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

- BRIDGWATER, T. Biomass for energy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. v. 86, n. 12, p. 1755-1768, 2006. DOI: 10.1002/jsfa.2605.
- BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**. v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007. DOI: 10.1590/s0103-40142007000100015.
- CANTO, J. L. Colheita Mecanizada de Biomassa Florestal para Energia. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2009.
- CARNEIRO, A. C. O.; OLIVEIRA, A. C. Produção sustentável de carvão vegetal. Viçosa, SIF, 2013. 39p.
- CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. ANEEL define reajuste das tarifas da CEMIG. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/reajuste\\_tarifario.aspx](http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/reajuste_tarifario.aspx)> Acesso em julho de 2015.
- CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. Atlas da Bioenergia do Brasil. Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO, Convênio 721606/2009 – MME. São Paulo, 2009.
- CHAN, F. T. S., ZHANG T. The impact of collaborative transportation management on supply chain performance: A simulation approach. **Expert Systems With Application**, v. 38, n. 3, p. 2319-2329, 2011. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.08.020.
- CHANG, N.; PARVATHINATHAN, G.; BREEDENC, J. B. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. **Journal of Environmental Management** v. 87, n. 1, p. 139-153, 2008. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.01.011.
- CHARABI, Y.; GASTLI, A. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. **Renewable Energy**. v. 36, n. 9, p. 2554-2561, 2011. DOI: 10.1016/j.renene.2010.10.037.
- CHEALI, P.; POSADA, J. A.; GERNAEY, K. V.; SIN, G. Upgrading of lignocellulosic biorefinery to value-added chemicals: Sustainability and economics of bioethanol-derivatives. **Biomass and Bioenergy**. v. 75, p. 282-300, 2015. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.02.030.
- CHERP, A.; JEWELL, J. The three perspectives on energy security: intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. **Current Opinion in Environmental Sustainability**. v. 3, n. 4, p. 202-212, 2011. DOI: 10.1016/j.cosust.2011.07.001.
- CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. **Bioresour Technol**. v. 102, n. 2, p. 437-451, 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.010.
- CHURCH, R. L.; REVELLE, C. The maximal covering location problem. **Papers of the Regional Science Association**. v. 32, n. 1, p. 101-118, 1974. DOI: 10.1007/bf01942293.
- CI FLORESTAS. Disponível em: < <http://www.ciflorestas.com.br/>> Acesso em: dezembro de 2015.
- COBULOGLU, H. I.; BÜYÜKTAHTAKIN, I. E. A mixed-integer optimization model for the economic and environmental analysis of biomass production. **Biomass and Bioenergy**. v. 67, p. 8-23, 2014. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.03.025.

COELHO, S. T; PALETTA, C. E. M; FREITAS, M. A. V. Medidas Mitigadoras para a Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Geração Termelétrica. Brasília: Dupligráfica, 2000.

COLLINS, M. G.; STEINER, F. R.; RUSHMAN, M. J. Land-Use Suitability Analysis in the United States: Historical Development and Promising Technological Achievements. **Environmental Management**. v. 28, n. 5, p. 611-621, 2001. DOI: 10.1007/s002670010247.

COMBER, A.; DICKIE, J.; JARVIS, C.; MARTIN, P.; TANSEY, K. Locating bioenergy facilities using a modified GIS-based location-allocation-algorithm: Considering the spatial distribution of resource supply. **Applied Energy**. v. 154, p. 309-316, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.128.

COSTA, F. R. Modelo de aptidão e de localização-alocação de usinas bioenergéticas utilizando Sistemas de Informações Geográficas. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2014.

COUTO, L. <sup>(1)</sup>; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 71-92, 2004.

COUTO, L. <sup>(2)</sup>; MÜLLER, M. D.; TSUKAMOTO, A. A.; BARCELLOS, D. C.; FONSECA, E. M. B.; CORRÊA, M. R. Programa de pesquisa para avaliação de densidades de plantio e rotação de plantações de rápido crescimento para produção de biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 107-112, 2004.

DEMIRBAS, A. Political, economical and environmental impacts of biofuels: a review. **Applied Energy**. v. 86, p. 108-117, 2009. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.04.036.

DENIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>>. Acesso em: dezembro de 2015.

DER/MG – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais. RESUMO DA MALHA RODOVIÁRIA DO ESTADO DE MINAS GERAIS – 2014. Disponível em: <<http://www.der.mg.gov.br/saiba-sobre/rede-rodoviaria/52-malha-do-estado>>. Acesso em julho de 2015.

DEVLIN, G.; TALBOT, B. Deriving cooperative biomass resource transport supply strategies in meeting co-firing energy regulations: A case for peat and wood fibre in Ireland. **Applied Energy**, v. 113, p. 1700-1709, 2014. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.09.019.

DORNBURG, V.; VAN VUUREN, D.; VAN DE VEN, G.; LANGEVELD, H.; MEEUSEN, M.; BANSE, M.; VAN OORSCHOT, M.; ROS, J.; VAN DEN BORN, G. J. AIKING, H.; LONDO, M.; MOZAFFARIAN, H.; VERWEIJ, P.; LYSENG, E.; FAAIJ, A. Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy. **Energy Environmental Science**. v. 3, n. 3, p. 258-267, 2010. DOI: 10.1039/b922422j.

DONG, J. GIS and Location Theory Based Bioenergy Systems Planning. Thesis, Master of Applied Science in Systems Design Engineering. University of Waterloo. Waterloo, Canada, 2008.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2014, ano base 2013. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2014.

- FARAHANI, R. Z.; STEADIESEIFI, M.; ASGARI, N. Multiple criteria facility location problems: a survey. **Applied Mathematical Modelling**. v. 34, n. 7, p. 1689-1709, 2010. DOI: 10.1016/j.apm.2009.10.005.
- FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais. Potencial de Energias Renováveis: Volume II –Biomassa, resíduos e hidroeletricidade. Belo Horizonte, 2014.
- FREITAS, M. A. V.; DI LASCIO, M. A.; ROSA, L. P. Biomassa Energética Renovável para o Desenvolvimento Sustentável da Amazônia. **Revista Brasileira de Energia**. v. 5, n. 1, p. 71-97, 1996.
- FREPPAZ, D.; MINCIADIA, R.; ROBBAB, M.; ROVATTIA, M.; SACILEA, R.; TARMASSOA, A. Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level. **Biomass and Bioenergy**. v. 26, n. 1, p. 15-25, 2004. DOI: 10.1016/s0961-9534(03)00079-5
- GENUS, A.; MAFAKHERI, F. A neo-institutional perspective of supply chains and energy security: Bioenergy in the UK. **Applied Energy**. v. 123, p. 307-315, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.084.
- GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**. v. 32, n. 3, São Paulo, 2009.
- GORDINHO, M. C. Do álcool ao etanol: trajetória única. Editora Terceiro Nome. São Paulo, 2010.
- HAKIMI, S. L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. **Operations Research**, v. 12, n. 3, p. 450-459, 1964. DOI: 10.1287/opre.12.3.450.
- HALL, D. O.; HOUSE, J. I.; SCRASE, I. Visão geral de energia e biomassa. In: ROSILLO–CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira. Campinas: UNICAMP, 2005. p. 25-67.
- HERRAN, D. S.; NAKATA, T. Design of decentralized energy systems for rural electrification in developing countries considering regional disparity. **Applied Energy**. v. 91, n. 1, p. 130-145, 2012. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.09.022.
- HÖHN, J.; LEHTONEN, E.; RASI, S.; RINTALA, J. A Geographical Information System (GIS) based methodology for determination of potential biomasses and sites for biogas plants in southern Finland. **Applied Energy**. v. 113, p. 1-10, 2014. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.07.005.
- IAC - InterAcademy Council. Lighting the Way: Toward a Sustainable Energy Future, Amsterdam. The Netherlands, 2007, p. 111.
- IBA – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Iba 2015. Disponível em: <[http://www.iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://www.iba.org/images/shared/iba_2015.pdf)>. Acesso em agosto de 2015.
- IBGE– Instituto Brasileiro de Estatística e Geografia. SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação de Automática. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: dezembro de 2015.
- IEF – Instituto Estadual de Florestas. Inventário Florestal da Flora Nativa e dos Reflorestamento MG. Belo Horizonte, Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.inventarioflorestal.mg.gov.br>>. Acesso em julho de 2015.

IGAM Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/banco-de-noticias/1-ultimas-noticias/1327-secretario-participa-da-entrega-da-comenda-ambiental-de-sao-lourenco>>. Acesso em julho de 2015.

INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais. <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Topodata. Disponível em: < <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. >. Acesso em: julho de 2015.

JANKOWSKI, P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. **International Journal of Geographical Information Systems**. v. 9, n. 3, p. 251-273, 1995. DOI: 10.1080/02693799508902036.

JIANG, H.; EASTIMAN, J. R. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. **International Journal of Geographical Information Science**. v. 14, n. 2, p. 173-184, 2000. DOI: 10.1080/136588100240903.

JOSS, B. N.; HALL, R. J.; SILDDERS, D. M.; KEDDY, T. J. Fuzzy-logic modeling of land suitability for hybrid poplar across the Prairie Provinces of Canada. **Environmental Monitoring Assessment**. v. 141, n. 1-3, p. 79-96, 2007. DOI:10.1007/s10661-007-9880-2.

KANGAS, A.; KANGAS, J.; LAUKKANEN, K. Fuzzy Multicriteria Approval Method and its Application to Two Forest Planning Problems. **Forest Science**. v. 52, n.3, p. 232-242, 2006.

KARYPIS, G.; KUMAR, V. Metis, a hypergraph partitioning package version 1.5.3. 1998.

KARYPIS, G.; KUMAR, V. A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs. **SIAM Journal on Scientific Computing**. v. 20, n. 1, p. 359-392, 1998. DOI: 10.1137/s1064827595287997.

KHACHATRYAN, H.; JESSUP, E.; CASAVANT, K. A GIS-based Estimation of Regional Biomass Supply and Transportation Costs for Biofuel Plant Least-Cost Location Decisions. In: Annual Transportation Research Forum, 53p., 2010, Arlington. Journal of the Transportation Research Forum. Arlington, 2010.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**. v. 220, n. 4598, pp. 671-680, 1983.

KOIKAI, J.S. Utilizing GIS-based suitability modeling to assess the physical potential of bioethanol processing plants in Western Kenya. **Papers in Resource Analysis**. v. 10, 12 pp. 2008.

KONG, J.; RÖNNQVIST, M.; FRISK, M. Using mixed integer programming models to synchronously determine production levels and market prices in an integrated market for roundwood and forest biomass. **Annals of Operations Research**. v. 232, p.179–199, 2013. DOI 10.1007/s10479-013-1450-0

KÜHMAIER, M.; KANZIAN, C.; STAMPFER, K. Identification of potential energy wood terminal locations using a spatial multicriteria decision analysis. **Biomass and Bioenergy**. v. 66, p. 337-347, 2014. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.03.048.

KUMAR, A.; CAMERON, J. B.; FLYNN, P. C. Biomass power cost and optimum plant size in western Canada. **Biomass and Bioenergy**. v. 24, n. 6, p. 445-464, 2003. DOI: 10.1016/s0961-9534(02)00149-6.

- LAUKKANEN, S., A. KANGAS, AND J. KANGAS. Applying voting theory in natural resource management: A case of multiple-criteria group decision support. **Journal of Environmental Management**. v. 64, n. 2, p. 127-137, 2002. DOI:10.1006/jema.2001.0511
- LEWIS, S. M.; GROSS, S.; VISEL, A.; KELLY, M.; MORROW, W. Fuzzy GIS-based multi-criteria evaluation for US Agave production as a bioenergy feedstock. **GCB Bioenergy**. v. 7, n. 1, p. 84-99, 2014. DOI: 10.1111/gcbb.12116.
- LOVETT, A.A.; SÜNNENBERG, G. M.; RICHTER, G. M.; DAILEY, A. G.; RICHE, A. B.; KARP, A. Land Use Implications of Increased Biomass Production Identified by GIS-Based Suitability and Yield Mapping for Miscanthus in England. **BioEnergy Research**. v. 2, n. 1-2, p. 17-28, 2009. DOI: 10.1007/s12155-008-9030-x.
- MACHADO, C. C. Colheita Florestal. 3. ed. Viçosa: UFV, 2014. 534 p.
- MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**. v. 62, n. 1, p. 3-65, jul. 2004. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.progress.2003.09.002.
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. Plano Nacional de Agroenergia 2006–2011. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 110 p.
- MILLERA, H. J. Collaborative mobility: using geographic information science to cultivate cooperative transportation systems. **Procedia Social and Behavioral Sciences**. v. 21, p. 24-28, 2011. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.07.005.
- MINAS GERAIS. Leis e decreto, etc. Governo do Estado. Lei nº 20.922, de 16 de outubro de 2013. Dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade no Estado. Diário do Executivo – “Minas Gerais”. Belo Horizonte, MG.
- MIRANDA, M. A. S. Potencial da biomassa florestal para produção de energia térmica industrial. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2015.
- MIURA, A. K; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANJOS, S. D.; LUIZ, A. J. B. Avaliação de áreas potenciais ao cultivo de biomassa para produção de energia e uma contribuição de sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas. **Engenharia Agrícola**. v. 31, n. 3, p. 607-620, 2011. DOI:10.1590/s0100-69162011000300020.
- MME – MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. Ministério de Minas e Energia. Brasília: EPE, 2008. 250 p.
- MORAES, M. A. F. D.; NASSAR, A. M.; MOURA, P. LEAL, R. L. V.; CORTEZ, L. A. B. Jet biofuels in Brazil: Sustainability challenges. **Renewable and Sustainable Energy Review**. v. 40, p. 716-726, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.210.
- NITSCH, M. O programa de biocombustíveis Proalcool no contexto da estratégia energética brasileira. **Revista de Economia Política**. v. 11, n. 2, p. 123-138, 1991.
- NOON, C. E.; DALY, M. J. GIS-based biomass resource assessment with BRAVO. **Biomass and Bioenergy**. v. 10, n. 2-3, p. 101-109, 1996. DOI:10.1016/0961-9534(95)00065-8.

OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review. **European Journal of Operational Research**. v. 111, n. 3, p. 423-447, 1998. DOI:10.1016/s0377-2217(98)00186-6.

PANICHELLI, L.; GNANSOUNOU, E. GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources competition between facilities. **Biomass and Bioenergy**. v. 32, n. 4, p. 289-300, 2008. DOI:10.1016/j.biombioe.2007.10.008.

PAULO, H.; AZCUE, X.; BARBOSA-PÓVOA, A. P.; RELVAS, S. Supply chain optimization of residual forestry biomass for bioenergy production: The case study of Portugal. **Biomass and Bioenergy**. v. 83, p. 245-256, 2015. DOI:10.1016/j.biombioe.2015.09.020.

PERPIÑA, C.; MARTÍNEZ-LLARIO, J. C.; PÉREZ-NAVARRO, A. Multicriteria assessment in GIS environment for siting biomass plants. **Land Use Policy**. v. 31, p. 326-335, 2013. DOI: 10.1016/j.landusepol.2012.07.014.

PIRKUL, H.; JAYARAMAN, V. A multi-commodity, multi-plant, capacitated facility location problem: formulation and efficient heuristic solution. **Computers & Operations Research**. v. 25, n. 10, p. 869-878, 1998. DOI:10.1016/S0305-0548(97)00096-8.

POLO, G.; ACOSTA, C. M.; FERREIRA, F.; DIAS, R. A. Location-Allocation and Accessibility Models for Improving the Spatial Planning of Public Health Services. **PLOS ONE - Public Library of Science**. v. 10, n. 3, p. 1-14, 2015. DOI:10.1371/journal.pone.0119190.

PORTUGUAL-PEREIRA, J.; SORIA, R.; RATHMANN, R.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Technoeconomic and environmental assessment in Brazil. **Biomass and Bioenergy**. v. 81, p. 521-533, 2015. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.08.010.

RAAD, T. J. Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015. 150 p.

RAMOS, R.A.R. Localização industrial – Um modelo espacial para o Noroeste de Portugal. 2000. Doutorado em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Braga, 2000.

RANTA, T. Logging residues from regeneration feelings for biofuel production – a GIS-based availability analyses in Finland. **Biomass and Bioenergy**. v. 28, n. 2, p. 171-182, 2005. DOI: 10.1016/j.biombioe.2004.08.010.

RECHE-LÓPEZ, P.; RUIZ-REYES, N.; GALÁN, S. G.; JURADO, F. Comparison of metaheuristic techniques to determine optimal placement of biomass power plants. **Energy Conversion and Management**. v. 50, n. 8, p. 2020-2028, 2009. DOI:10.1016/j.enconman.2009.04.008.

REVELLE, C.S.; EISELT, H.A. Locations Analysis: A synthesis and survey. **European Journal of Operational Research**. v. 165, n. 1, p. 1-19, 2005. DOI:10.1016/j.ejor.2003.11.032.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. Industrial Uses of Biomass Energy: the example of Brazil. Londres – Nova York: Taylor & Francis, 2000. 304 p.

- SAATY, T.L.; VARGAS, G. L. Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process. 2. ed. Boston: Kluwer, 2001. 346 p.
- SAATY, T.L. The Analytical Hierarchy Process - what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**. v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987. DOI:10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- SICAT, R. S.; CARRANZA, E. J. M.; NIDUMOLU, U. B. Fuzzy modeling of farmers' knowledge for land suitability classification. **Agricultural Systems**. v. 83, n. 1, p. 49-75, 2005. DOI:10.1016/j.agsy.2004.03.002.
- SILVERT, W. Fuzzy indices of environmental conditions. **Ecological Modelling**. v. 130, n. 1-3, p. 111-119, 2000. DOI:10.1016/s0304-3800(00)00204-0.
- SIMS, R. The brilliance of bioenergy: in business and in practice. London: Earthscan, 2002. 316 p.
- SHIKIDA, P. F. A.; AZEVEDO, P. F.; VIAN, C. E. F. Desafios da agroindústria canavieira no Brasil pós-desregulamentação: uma análise das capacidades tecnológicas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**. v. 49, n. 3, p. 599-628, 2011. DOI: 10.1590/S0103-20032011000300004.
- SONG, J.; YANG, W.; HIGANO, Y.; WANG, X. Dynamic integrated assessment of bioenergy technologies for energy production utilizing agricultural residues: An input-output approach. **Applied Energy**. v. 158, p. 178-189, 2015. DOI:10.1016/j.apenergy.2015.08.030.
- STAISS, C.; PEREIRA, H. Biomassa: energia renovável na agricultura e no setor florestal. **Centro de Estudos Florestais AGROS**. n. 1, p. 1-10, 2001.
- SULTANA, A.; KUMAR, A. Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system. **Applied Energy**. v. 94, p. 192-201, 2012. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.01.052.
- TRAN, K.; LUO, X.; SEISENBAEVA, G.; JIRJIS, R. Stump torrefaction for bioenergy application. **Applied Energy**. v. 112, p. 539-546, 2013. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.12.053.
- UFV – Universidade Federal de Viçosa. Infraestrutura de Dados Espaciais GeoMINAS. Disponível em: <<http://www.ide.ufv.br/geominas/srv/br/main.home>>. Acesso em julho de 2015.
- VAN DAM, J. van; FAAIJ, A.P.C.; LEWANDOWSKI, I.; FISCHER, G. Biomass production potentials in Central and Eastern Europe under different scenarios. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, n. 6, p. 345-366, jun. 2007. DOI: 10.1016/j.biombioe.2006.10.001.
- VAN EIJCK J.; BATIDZIRAI, B.; FAAIJ, A. Current and future economic performance of first and second generation biofuels in developing countries. **Applied Energy**. v. 135, p. 115-141, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.08.015.
- VENENDAAL, R.; JØRGENSEN, U.; FOSTER, C. European energy crops: a synthesis. **Biomass and Bioenergy**. v. 13, n. 3, p. 147-185, 1997. DOI:10.1016/s0961-9534(97)00029-9.
- VIANA, H.; WARREN, B. C.; LOPES, D.; ARANHA, J. Assessment of forest biomass for use as energy. GIS-based analysis of geographical availability and locations of

wood-fired power plants in Portugal. **Applied Energy**. v. 87, n. 8, p. 2551-2560, 2010. DOI:10.1016/j.apenergy.2010.02.007.

VIGUIRISTI, J.A. Biocombustibles de segunda generación. **Física y Sociedad**. n.19, p. 31-33, 2008.

VOETS, T.; NEVEN, A.; THEWYS, T.; KUPPENS, T. GIS-BASED location optimization of a biomass conversion plant on contaminated willow in the Campine region (Belgium). **Biomass and Bioenergy**. v. 55, p. 339-349, 2013. DOI:10.1016/j.biombioe.2013.02.037.

VOIVONTAS, D.; ASSIMACOPOULOS, D; KOUKIOS, E.G. Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. **Biomass and Bioenergy**. v. 20, n. 2, p. 101-112, 2001. DOI: 10.1016/s0961-9534(00)00070-2.

WALSH, M. E.; GRAHAM, R. L. Economic analysis of energy crop production in the US - Location, quantities, price and impacts on traditional agricultural crops. In: Proceedings, BioEnergy 98, Expanding Bioenergy Partnerships, Madison, 1998.

WANG, F.; SHI, X. Geospatial analysis for utilizing the marginal land in regional biofuel industry: A case study in Guangdong Province, China. **Biomass and Bioenergy**. v. 83, p. 302-310, 2015. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.10.005.

WORLDCLIM. Versão 1.4, release 3. Disponível em: <<http://www.worldclim.org>>. Acesso em nov. de 2015.

WU, J.; WANG, J.; STRAGER, M. P. A two-stage GIS-based suitability model for siting biomass-to-biofuel plants and its application in West Virginia, USA. **International Journal of Forest Engineering**. v. 22, n. 2, 2011. DOI: 10.1080/14942119.2011.10702608.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**. v. 8, p. 338-353, 1965.

ZHAN, F. B.; CHEN, X.; NOON, C. C.; WU, G. A GIS-enabled comparison of fixed and discriminatory pricing strategies for potential switchgrass-to-ethanol conversion facilities in Alabama. **Biomass and Bioenergy**. v. 28, n. 3, p. 295-306, 2005. DOI:10.1016/j.biombioe.2004.06.006.

ZHANG, F.; JOHNSON, D. M.; SUTHERLAND, J. W. A GIS-based method for identifying the optimal location for a facility to convert forest biomass to biofuel. **Biomass and Bioenergy**. v. 35, n. 9, p. 3951-3961, 2011. DOI:10.1016/j.biombioe.2011.06.006.

## ANEXO 1

### Discretização das áreas de plantios em subconjuntos de áreas semelhantes utilizando o software h-metis

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: iso-8859-15 -*-

import arcpy, os, itertools, time, sys
from math import factorial
import math
import numpy as np
arcpy.env.overwriteOutput = True

def func_agrupa(inFCpoint, n_grupos, outFCpts, delaunay = True, distMax = ""):
    parm_metis = '5 20 5 3 1 1 0'
    SR = arcpy.Describe(inFCpoint).spatialReference

    ext = arcpy.Describe(inFCpoint).extent
    distMaxExt = ((ext.XMin - ext.XMax) ** 2 + (ext.YMin - ext.YMax) ** 2) ** 0.5

    if distMax == "":
        distMax = distMaxExt
    else:
        distMax = float(distMax)

    X = []
    with arcpy.da.SearchCursor(inFCpoint, ["SHAPE@xy"]) as cursor:
        for row in cursor:
            X.append( [row[0][0], row[0][1] ] )

    #dir_metis = r'C:\CMD\hmetis-1.5.3-WIN32'
    dir_metis = os.path.dirname(sys.argv[0]) + '\\hmetis-1.5.3-WIN32'
    dir_metis = r'C:\Thaisa\Projeto
Mestrado\Base_dados\plantios_MG\discretiza\hmetis-1.5.3-WIN32'

    out_fname = dir_metis + "\\dadosMetis.hgr"
    outfile = open(out_fname, "w")

    def distEuclid(p1, p2):
        (x1, y1) = p1
        (x2, y2) = p2
        return ((x1 - x2) ** 2 + (y1 - y2) ** 2) ** 0.5

    N = len(X)

    if delaunay:
        try:
            from scipy.spatial import Delaunay
```

```

except:
    arcpy.AddError("Unable to import the library scipy. This library is \
used to perform the Delaunay triangulation, so it should be installed. \
Available in http://www.scipy.org/")
    sys.exit()

Xnp = np.array(X)
Xnp[:,0] = Xnp[:,0] - Xnp[:,0].min()
Xnp[:,1] = Xnp[:,1] - Xnp[:,1].min()

trian = Delaunay(X)
trianId = trian.simplices.copy()
trianPts = [(0, 1), (0, 2), (1, 2)]
if distMax == distMaxExt:
    outfile.write(str(len(trianId)*3) + " " + str(N) + " 1\n")
    for i in trianId:
        for j in trianPts:
            p1 = X[i[j[0]]]
            p2 = X[i[j[1]]]
            dE = distEuclid(p1, p2)
            custo = int(distMaxExt - dE + distMaxExt/100)
            outfile.write(str(custo) + " " + str(i[j[0]]+1) + " " + str(i[j[1]]+1) + "\n")
else:
    dElist = []
    for i in trianId:
        for j in trianPts:
            p1 = X[i[j[0]]]
            p2 = X[i[j[1]]]
            dE = distEuclid(p1, p2)
            if dE <= distMax: #dE <= distMax
                dElist.append([i[j[0]],i[j[1]],int(distMaxExt - dE + distMaxExt/100)] )
    outfile.write(str(len(dElist)) + " " + str(N) + " 1\n")
    for i in dElist:
        outfile.write(str(i[2]) + " " + str(i[0]+1) + " " + str(i[1]+1) + "\n")

else:
    nEdges = int(factorial(N)/(factorial(2)*factorial(N-2)))
    outfile.write(str(nEdges) + " " + str(N) + " 1\n")
    for par in itertools.combinations(range(N), 2):
        p1 = X[par[0]]
        p2 = X[par[1]]
        custo = int(distMaxExt - distEuclid(p1, p2) + distMaxExt/100)
        outfile.write(str(custo) + " " + str(par[0]+1) + " " + str(par[1]+1) + "\n")

outfile.close()

exe_fname = dir_metis + "\\exec_hmetis.bat"
exefile = open(exe_fname, "w")

exefile.write("@echo off\n")
exefile.write("hmetis dadosMetis.hgr " + str(n_grupos) + " " + parm_metis + "\n")
#exefile.write("pause\n")

```

```

exefile.close()

os.chdir(dir_metis)
start_time = time.time()
try:
    os.system("exec_hmetis.bat")
except:
    pass

arcpy.AddMessage("\n" + "Tempo de Processamento: " + str(time.time()-start_time) +
"s.")

n_arq_sol = str("\\dadosMetis.hgr.part." + str(n_grupos))
arq_sol = open(dir_metis + n_arq_sol, 'r')
lines = arq_sol.readlines()
grupos = []
for line in lines:
    grupos.append(int(line))

arq_sol.close()

try:
    os.remove(dir_metis + n_arq_sol)
    os.remove(out_fname)
    os.remove(exe_fname)
except:
    pass

outFCtemp = "in_memory\\outFCtemp"
arcpy.CreateFeatureclass_management(os.path.dirname(outFCtemp),
os.path.basename(outFCtemp), "POINT", spatial_reference=SR)

arcpy.AddField_management(outFCtemp, "Grupos", "LONG")

with arcpy.da.InsertCursor(outFCtemp, ["SHAPE@", "Grupos"]) as cur:
    for i in range(len(grupos)):
        shapeXY = X[i]
        cur.insertRow([shapeXY, grupos[i]])

arcpy.Sort_management(outFCtemp, outFCpts, "Grupos")
return outFCpts

## Inputs
inFC= arcpy.GetParameterAsText(0)
# inFC = r'C:\Thaisa\Projeto
Mestrado\Base_dados\plantios_MG\producao_mg.gdb\plantios_prod'

myID = arcpy.GetParameterAsText(1)
#myID = "meuID"

outFC_pol = arcpy.GetParameterAsText(2)

```

```

#outFC_pol = r'C:\Thaia\Projeto
Mestrado\Base_dados\plantios_MG\producao_mg.gdb\pols_prod'

outFC_pts = arcpy.GetParameterAsText(3)
#outFC_pts = r'C:\Thaia\Projeto
Mestrado\Base_dados\plantios_MG\producao_mg.gdb\pts_prod'

inFCcopy = "in_memory\inFCcopy"
arcpy.CopyFeatures_management(inFC, inFCcopy)

mIDlist = []
prod = []
with arcpy.da.SearchCursor(inFCcopy, [myID, "Producao_m"]) as cursor:
    for row in cursor:
        mIDlist.append(row[0])
        prod.append(row[1])

inFC_lyr = 'inFC_lyr'
arcpy.MakeFeatureLayer_management(inFCcopy, inFC_lyr)
pts_prod = []
pols_prod = []
prod_total_pts = 5000
for i in range(len(mIDlist)):
    n_pts = int(round(prod[i]/prod_total_pts))
    if n_pts >= 1:
        selec = str(myID + ' ' + str(mIDlist[i]))
        arcpy.SelectLayerByAttribute_management(inFC_lyr, "NEW_SELECTION",
        selec)
        pol_mID = str("in_memory\pol_mID"+str(mIDlist[i]))
        arcpy.CopyFeatures_management(inFC_lyr, pol_mID)
        if n_pts > 1:
            fishnet30 = "in_memory\fishnet30"
            fishnet30_label = "in_memory\fishnet30_label"
            desc=arcpy.Describe(pol_mID)
            # Set the origin of the fishnet
            originCoordinate = str(str(desc.extent.XMin)+" "+str(desc.extent.YMin))
            # Set the orientation
            yAxisCoordinate = str(str(desc.extent.XMin)+" "+str(desc.extent.YMin+10))
            maior = max(abs(desc.extent.YMin - desc.extent.YMax), abs(desc.extent.XMin
- desc.extent.XMax))
            div = 120
            arcpy.CreateFishnet_management(fishnet30,
            origin_coord = originCoordinate,
            y_axis_coord = yAxisCoordinate,
            template = pol_mID, cell_width = maior/div, cell_height = maior/div)
            fishnet30_label_clip = "in_memory\fishnet30_label_clip"
            arcpy.Clip_analysis(fishnet30_label, pol_mID, fishnet30_label_clip)
            outFCpts = str("in_memory\outFCpts"+str(mIDlist[i]))

            outFCptsR = func_agrupa(fishnet30_label_clip, n_pts, outFCpts, delaunay =
True, distMax = maior/div*math.sqrt(2))

```

```

out_raster = "in_memory\\out_raster"
arcpy.PointToRaster_conversion(outFCptsR, "Grupos", out_raster,
                               cellsize = maior/div)
out_pol = str("in_memory\\out_pol"+str(mIDlist[i]))
arcpy.RasterToPolygon_conversion(out_raster, out_pol,
                                 simplify = "NO_SIMPLIFY", raster_field = "VALUE")
arcpy.AddField_management(out_pol, "area", "DOUBLE")
arcpy.CalculateField_management(out_pol, "area", "!shape.area!",
"PYTHON_9.3")
out_pol_sort = str("in_memory\\out_pol_sort"+str(mIDlist[i]))
arcpy.Sort_management(out_pol, out_pol_sort, [["area", "DESCENDING"]])
i_cont = 0
with arcpy.da.UpdateCursor(out_pol_sort, 'SHAPE@') as cursor:
    for row in cursor:
        if i_cont >= n_pts:
            cursor.deleteRow()
            i_cont += 1
        out_pts = str("in_memory\\out_pts"+str(mIDlist[i]))
        arcpy.FeatureToPoint_management(out_pol_sort, out_pts, "INSIDE")
    else:
        out_pts = str("in_memory\\out_pts"+str(mIDlist[i]))
        arcpy.FeatureToPoint_management(pol_mID, out_pts, "INSIDE")
        out_pol_sort = pol_mID

pols_prod.append(out_pol_sort)
pts_prod.append(out_pts)
arcpy.AddMessage("\nNumero de pontos: " + str(n_pts))
arcpy.AddMessage("\nFim de execucao de ID: " + str(mIDlist[i]))

#arcpy.CopyFeatures_management(pts_prod, outFC)
arcpy.Merge_management(pols_prod, outFC_pol)
arcpy.Merge_management(pts_prod, outFC_pts)

```

## ANEXO 2

**Porcentagem de áreas das diferentes classes de aptidão dos municípios, ordenados por quantidade de áreas absolutas de zonas excelentes.**

