

FABRÍCIO RODRIGUES COSTA

**MODELO DE APTIDÃO E DE LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE
USINAS BIOENERGÉTICAS UTILIZANDO SISTEMAS DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

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
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C837m
2014 Costa, Fabrício Rodrigues, 1989-
Modelo de aptidão e de localização-alocação de usinas
bioenergéticas utilizando sistemas de informações geográficas /
Fabrício Rodrigues Costa. – Viçosa, MG, 2014.
x, 62 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 49-56.

1. Agroindústria canavieira. 2. Sistemas de informação
geográfica. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência
Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.958

FABRÍCIO RODRIGUES COSTA


**MODELO DE APTIDÃO E DE LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE
USINAS BIOENERGÉTICAS UTILIZANDO SISTEMAS DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

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*.

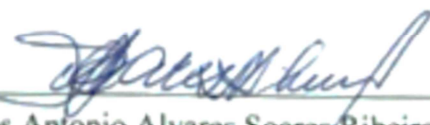
APROVADA: 12 de fevereiro de 2014.



Sady Júnior Martins da Costa de Menezes



Vicente Paulo Soares
(Coorientador)



Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar a vida, iluminar e acompanhar todos os meus passos e minhas decisões.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de desenvolver esta dissertação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

Aos meus queridos pais, Antônio Batista da Costa Neto e Aparecida Rodrigues Costa, e à minha irmã, Patrícia Rodrigues Costa. Obrigado por estarem ao meu lado em todos os momentos, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos, pelas contribuições à minha formação e por todo carinho, compreensão e incentivo.

À Déborah, por sempre me incentivar, pelo companheirismo, pelo amor, pelo carinho, pela dedicação e pela paciência nesses últimos anos.

Ao meu orientador, professor Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro, pela valiosa orientação, pelo apoio, pelos ensinamentos, pela confiança e pela oportunidade de cursar o mestrado. Agradeço pela amizade, dedicação e ajuda em todas as situações.

Aos professores, Vicente Paulo Soares e Sady Júnior Martins da Costa de Menezes, pelas valiosas sugestões e contribuições neste trabalho.

Aos familiares, colegas e amigos, que mesmo de longe torceram pelo meu sucesso.

Aos amigos de Viçosa e do laboratório SIGMA, em especial ao Gustavo e ao Nero, pela preciosa ajuda neste trabalho, pela amizade e pelo grande amparo em momentos árduos.

A Laís Naiara Gonçalves dos Reis pela disponibilização dos arquivos, em formato vetorial, do mapeamento da área plantada com cana-de-açúcar para a região do Triângulo Mineiro-MG .

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

BIOGRAFIA

FABRÍCIO RODRIGUES COSTA, filho de Antônio Batista da Costa Neto e de Aparecida Rodrigues Costa, nasceu em 3 de fevereiro de 1989, na cidade de Paracatu, Minas Gerais.

Em 2007, ingressou na graduação de Engenharia Florestal, na Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, Minas Gerais.

Em janeiro de 2012, concluiu o curso de Engenharia Florestal e, em fevereiro do mesmo ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UFV, em nível de Mestrado, defendendo sua dissertação em 12 de fevereiro de 2014.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS..... | v |
| LISTA DE TABELAS..... | vi |
| RESUMO..... | vii |
| ABSTRACT..... | ix |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Relevância do estudo..... | 2 |
| 2. OBJETIVO..... | 4 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 3.1 Modelo de localização-alocação do tipo p-medianas..... | 5 |
| 3.2 Cana-de-açúcar (<i>Saccharum</i> spp.)..... | 9 |
| 3.2.1 Origem e classificação botânica..... | 9 |
| 3.2.2 Aspectos edafoclimáticos para o plantio de cana-de-açúcar..... | 9 |
| 3.2.3 Produção de cana-de-açúcar no Brasil..... | 10 |
| 3.2.4 Bioenergia..... | 12 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS..... | 17 |
| 4.1 Área de estudo..... | 17 |
| 4.2 Base de dados..... | 18 |
| 4.3 Análises espaciais..... | 22 |
| 4.3.1 Zonas de exclusão..... | 23 |
| 4.3.2 Zonas de aptidão e localizações potenciais..... | 27 |
| 4.4 Modelo de localização-alocação..... | 31 |
| 4.5 Fluxograma geral da metodologia..... | 33 |
| 4.6 <i>Softwares</i> | 33 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 35 |
| 5.1 Zonas de exclusão..... | 35 |
| 5.2 Locais potenciais para implantação de usinas bioenergéticas..... | 38 |
| 5.3 Melhores locais para implantação de usinas bioenergéticas..... | 44 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 48 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 49 |
| APÊNDICES..... | 57 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura da cana-de-açúcar. | 10 |
| Figura 2 – Distribuição dos locais planejados para novas usinas de grande porte e áreas de cana-de-açúcar nos estados do Espírito Santo, Paraná, Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. | 12 |
| Figura 3 – Localização das usinas sucroalcooleiras no Brasil. | 12 |
| Figura 4 – Alguns produtos e subprodutos da cana-de-açúcar. | 13 |
| Figura 5 – Localização da área de estudo, destacando seus municípios. | 17 |
| Figura 6 – Mapeamento das áreas de cultivo da cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro, MG, utilizando imagens digitais Rapideye. | 19 |
| Figura 7 – Visualização dos temas vetoriais da base de dados do estudo de caso. | 20 |
| Figura 8 – Temas matriciais da base de dados. | 22 |
| Figura 9 – Discretização em áreas menores. a) grade de 1.000 x 1.000 m; b) área de cana-de-açúcar; e c) interseção entre a e b, destacando os seus centroides. | 32 |
| Figura 10 – Fluxograma geral do processo. | 34 |
| Figura 11 – Zonas de exclusões da região do Triângulo Mineiro. | 35 |
| Figura 12 – Espacialização do Índice de Aptidão para a localização de usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro. | 39 |
| Figura 13 – Exemplo de pós-processamento do índice de aptidão: a) índice de aptidão original, b) reclassificação em 5 classes e c) refinamento. | 40 |
| Figura 14 – Classes de aptidão para implantação de usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro, após as etapas de reclassificação e refinamento da superfície de resposta original. | 41 |
| Figura 15 – Área total de cada classe de aptidão, para a região do Triângulo Mineiro. | 41 |
| Figura 16 – Municípios do Triângulo Mineiro, em ordem crescente de aptidão para instalação de usinas bioenergéticas. | 42 |
| Figura 17 – Centroides dos melhores locais potenciais, com áreas superiores a 5 ha, para implantação de usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro. | 43 |
| Figura 18 – (a) Distância média e (b) distância total em função do número de usinas. As barras verticais representam o desvio-padrão. | 45 |
| Figura 19 – Representação das localizações ideais das usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro para $p = 1$; $p = 4$; $p = 10$; $p = 15$; $p = 20$; e $p = 30$ | 47 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Quantidade de soluções do problema com natureza combinatorial..... | 7 |
| Tabela 2 – Composição química da cana-de-açúcar madura..... | 10 |
| Tabela 3 – Produção brasileira de cana-de-açúcar, em milhões de toneladas, bem como para as suas regiões e os seus estados..... | 11 |
| Tabela 4 – Energia da cana-de-açúcar para colmos limpos..... | 15 |
| Tabela 5 – Localidades restritas para o desenvolvimento de uma usina bioenergética. .. | 26 |
| Tabela 6 – Peso assinalado a cada critério..... | 30 |
| Tabela 7 – Áreas com restrição para cada tema no Triângulo Mineiro..... | 36 |
| Tabela 8 – Áreas com e sem restrição para cada município do Triângulo Mineiro. | 37 |
| Tabela 9 – Reclassificação do índice de aptidão pelo método de Jenks..... | 40 |

RESUMO

COSTA, Fabrício Rodrigues, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2014. **Modelo de aptidão e de localização-alocação de usinas bioenergéticas utilizando Sistemas de Informações Geográficas.** Orientador: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Coorientador: Vicente Paulo Soares

O objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo de aptidão e de localização-alocação, alicerçado na tecnologia dos Sistemas de Informações Geográficas, para otimizar a distribuição espacial de usinas bioenergéticas de cana-de-açúcar, visando à produção de álcool e à geração de bioeletricidade na região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais. Foram utilizados os *softwares* ArcGIS 10.2 e Microsoft Excel 2010. As bases de dados foram constituídas de 15 temas. Os procedimentos de análises espaciais foram divididos em duas etapas: 1) identificação das zonas de exclusão, que compunham as localidades com restrições absolutas; e 2) identificação das zonas de aptidão e das localizações potenciais de usinas bioenergéticas. As zonas aptas foram obtidas pelo processo multicriterial de Combinação Linear Ponderada, que utilizou as zonas de exclusão, os nove critérios (áreas de plantio de cana-de-açúcar, áreas urbanas, hidrografia, biomas, declividades, uso da terra, ferrovias, linhas de transmissão e rodovias), bem como os seus respectivos pesos gerados pelo Processo Analítico Hierárquico (AHP). Posteriormente, o *raster* gerado foi reclassificado em cinco classes (muito baixa, baixa, média, alta, muito alta), empregando-se o método *Natural Breaks* (Jenks), seguido de uma etapa de pós-processamento. Por fim, selecionaram-se áreas superiores a 50.000 m² e pertencentes à classe **muito alta**, que foram convertidas a pontos, representando os locais potenciais. O problema de localização ideal foi solucionado por meio do Modelo de Localização-Alocação, disponível no ArcGIS, utilizando-se a opção *Maximize Capacitated Coverage* do módulo *Location-Allocation*, que minimiza a soma das distâncias entre os pontos de oferta de cana-de-açúcar e as usinas bioenergéticas. Foram desenvolvidos vários cenários para instalação de usinas com demandas decrescentes de capacidade – 24 a 8,8 Mt/ano – em relação ao número crescente de usinas (de 1 até 30). Nesse modelo foram utilizados os locais potenciais gerados, a malha rodoviária e os centroides dos polígonos resultantes da interseção das áreas de cana-de-açúcar e de uma grade de 1.000 x 1.000 m. As localidades com restrições para instalação de usinas bioenergéticas representam aproximadamente 50 % da região. Constatou-se que a área central e a nordeste do Triângulo Mineiro são as

piores regiões para localizar usinas bioenergéticas, enquanto as regiões da periferia são as melhores. No planejamento estratégico de instalação de usinas é fundamental utilizar os sistemas de informações geográficas para apoiar o processo de tomada de decisão, bem como para apresentação sob a forma de mapas temáticos, que favorecem a compreensão do espaço de soluções e estimulam a interpretação mais abrangente do gestor. A análise multicritério foi eficaz para o desenvolvimento de um índice de aptidão. O aumento no número de usinas de menor capacidade resulta na sua melhor distribuição espacial.

ABSTRACT

COSTA, Fabrício Rodrigues, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2014. **Capacity and Location-Allocation Model of Bioenergetic Plant using the Geographic Information System.** Adviser: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Co-adviser: Vicente Paulo Soares.

The aim of this study was to develop a capacity and location-allocation model based upon the Geographic Information System (GIS) seeking to optimize the spatial distribution of sugarcane bioenergetic plants in order to produce alcohol and to generate biomass power in the region of Triângulo Mineiro, State of Minas Gerais, Brazil. It was used the softwares ArcGIS 10,2 and Microsoft Excel 2010. The databases consisted of 15 themes. The spatial analysis procedures have been divided into two steps: 1) exclusion zones that comprised fixed restriction sites and 2) zones of capability and of potential locations for bioenergetic plants. The suitable zones were obtained through multicriterial process of Weighted Linear Combination (WLC), which used the exclusion zones, the nine criteria (sugarcane growing areas, urban areas, hydrography, biome, declivity, land use, railroads, transmission line and highways), as well as their respective weights generated by the Analytic Hierarchy Process (AHP). Subsequently, the generated raster was reclassified into five categories (very low, low, medium, high, and too high) using the Natural Breaks (Jenks) method and then a post-processing step was performed. Finally, areas over 50,000m² of very high category were selected, which have been converted into points representing potential sites. The problem of optimal location was ascertained by means of the Location-Allocation Model using the Maximize Capacitated Coverage option of the Location-Allocation module that minimizes the amount of the distances among points of supply of sugarcane and bioenergetic plants. Several scenarios were developed for the establishment of power plants with decreasing capacity demands – from 24 to 8.8 Mt/year – regarding the growing number of power plants up to 30. In this model, the generated potential sites, the road mesh, the centroids of the sugarcane field intersection and the 1,000 x 1,000 m grid were used. The restricted sites concerning the installation of bioenergetic plants represent nearly 50 % of the region. It was founded that the central area and the Northeastern area of the Triângulo Mineiro are the worst areas to locate bioenergetic plants while the areas of periphery are the best one for this purpose. The use of geographic information systems is crucial to the strategic planning of bioenergetic

plants establishment to support the decision-making process as well as the exhibition in thematic maps, which contribute to comprehend the search space and also encourage a broader interpretation of the manager. The multicriteria analysis was efficient for the development of a capacity index. The enhancement of the number of small capacity power plants leads to a better spatial distribution.

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia no século passado foi caracterizada, em todo o mundo, pelo uso intensivo de combustíveis fósseis, como carvão mineral, gás natural e petróleo. No início desse século os combustíveis fósseis ainda contribuía com 80 % de toda a energia mundial produzida (WEA, 2000). Porém, desde a crise do petróleo de 1973, vêm ocorrendo mudanças radicais nas matrizes energéticas de diversos países, deflagradas pela crescente conscientização da sociedade acerca da necessidade de substituir os combustíveis fósseis por fontes renováveis. Essas mudanças buscam estabelecer patamares seguros para utilização de recursos naturais, soluções que são, cada vez mais, política e ambientalmente desejadas (QUEIROZ, 2008).

O Brasil privilegia-se dessas mudanças, oferecendo extraordinárias oportunidades para o setor agrícola, em razão do grande potencial para produção de culturas bioenergéticas, que são opções viáveis, sustentáveis e racionais para substituir parte das fontes não renováveis (CORTEZ *et al.*, 2013). Dentre as culturas bioenergéticas mais pesquisadas no Brasil podem-se citar: a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), o eucalipto (*Eucalyptus* sp.), o girassol (*Helianthus annuus*), a mamona (*Ricinus communis*), a soja (*Glycine Max*) e, mais recentemente, a macaúba (*Acrocomia aculeata*) e o pinhão-manso (*Jatropha curcas*) (COYLE, 2007; GUERRA; FUCHS, 2009; SIMON, 2009; CORTEZ *et al.*, 2013).

A participação do etanol e da bioeletricidade produzidos a partir da cana-de-açúcar, principal cultura energética no País, é da ordem de 15 a 18 % da matriz energética brasileira (MIRANDA, 2013). A expansão das lavouras e da oferta desses produtos são fundamentais para os acordos assumidos pelo governo brasileiro no âmbito da Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC), para maior segurança e diversificação da matriz energética, bem como para atender à crescente demanda de etanol (BRASIL, 2010; EBC, 2013). Estima-se em pelo menos 100 o número de usinas de etanol a serem criadas até 2020 para atender à demanda e duplicar a produção de etanol (EBC, 2013).

Dentre os diversos desafios com que o setor bioenergético nacional se depara em curto e médio prazos, destaca-se a necessidade de otimizar a localização de suas usinas. A identificação dos locais mais apropriados é um assunto altamente complexo, com profundas repercussões de natureza social, econômica e ambiental. O alto impacto dessa

decisão nos custos de produção e transporte dita, em última análise, o sucesso ou o fracasso do empreendimento (BEHAINE, 2012).

Um levantamento regional minucioso e atualizado acerca da legislação vigente, da proximidade das fontes de matéria-prima, de rodovias, de ferrovias, da hidrografia, entre outros, é imprescindível para reduzir os riscos e maximizar o retorno dos investimentos relacionados à implantação de uma usina. Com os altos preços dos combustíveis atuais e a distribuição geográfica bastante dispersa da matéria-prima, esse empreendimento torna-se mais sensível à decisão de uma localização ótima e, portanto, necessita de um planejamento para minimizar, em médio e longo prazos, os custos de transporte. A otimização da distância da matéria-prima à usina para reduzir esses custos é um problema clássico de localização-alocação. Em geral, selecionam-se, de um conjunto de locais potenciais definidos preferencialmente ao longo de uma rede, por exemplo, malha rodoviária, os melhores locais para múltiplas instalações, alocando-se a matéria-prima e considerando, quando presentes, as suas demandas e capacidades (GALVÃO, 1981; MAPA, 2007; LORENA *et al.*, 2001).

Aparentemente simples, esses são problemas cujo tempo para obter a solução exata cresce exponencialmente com o número de locais potenciais e de instalações, dada sua natureza combinatorial, ou seja, ainda não há algoritmo capaz de resolver grandes problemas em tempo razoável (MAPA, 2007). Diante disso, abordagens heurísticas e metaheurísticas, que produzem soluções ideais mas não necessariamente ótimas, são frequentemente utilizadas para resolver esse problema (HÖRNER, 2009).

Devido à natureza intrinsecamente espacial dos objetos de estudo, a tecnologia dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) mostra-se apropriada para o levantamento e a análise dessas informações (LORENA, 2001; MAPA, 2007; DONG, 2008; MAPA; LIMA, 2012; SULTANA; KUMAR, 2012).

1.1 Relevância do estudo

Com as estimativas de implantação de novas usinas bioenergéticas no Brasil, para atender à elevada demanda por alternativas de combustíveis não renováveis, o planejamento estratégico da localização ótima dessas usinas é um elemento-chave para reduzir custos, bem como para garantir maior competitividade do setor. Este estudo centra-se no estabelecimento de um modelo de aptidão e de otimização para o problema

clássico de localização-alocação, assinalando estrategicamente os pontos de oferta, isto é, locais de produção, para cada usina.

Em termos de pesquisa científica, a metodologia de investigação adotada neste trabalho classifica-se como de natureza aplicada, proporcionando conhecimentos e maior familiaridade para aplicação prática do problema de localização de usinas bioenergéticas, tanto para o setor privado quanto para o setor público. Além disso, trata-se de uma abordagem quali-quantitativa, com objetivos notadamente exploratórios (GIL, 2002; SILVA; MENEZES, 2005).

2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um modelo de aptidão e de localização-alocação alicerçado na tecnologia dos Sistemas de Informações Geográficas, para otimizar a distribuição espacial de usinas bioenergéticas de cana-de-açúcar, visando à produção de álcool e à geração de bioeletricidade na região do Triângulo Mineiro, MG.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelo de localização-alocação do tipo p-medianas

De acordo com Daskin (1995), Drezner (1995) e Brondani (2012), as decisões para implantação de facilidades, segundo as quais os clientes devem ser atendidos de forma ótima, é um problema clássico de localização. Conforme Mapa e Lima (2012), os problemas de localização de facilidades permitem identificar o melhor local para as instalações, em uma ampla gama de possibilidades. Esse tipo de problema tem por finalidade minimizar custos de operação, maximizar lucros ou prover alto nível de serviço aos clientes. Lorena *et al.* (2001) mencionam que o termo “facilidade” é frequentemente utilizado para designar fábricas, depósitos, escolas, entre outros, enquanto o termo “clientes” refere-se aos depósitos, às unidades de vendas, aos estudantes, etc. Geralmente diversas facilidades são simultaneamente localizadas que, por sua vez, são alocadas aos clientes.

Para Arakaki (2002), os problemas dessa natureza são conhecidos como problemas de localização-alocação. Lorena *et al.* (2001) ressaltam que esses problemas são encontrados tanto nos setores privados quanto públicos. Estes requerem a maximização da satisfação dos clientes com relação à localização de escolas, postos de saúde, corpo de bombeiros, ambulâncias, viaturas de polícia, pontos de ônibus, dentre outros, enquanto aqueles se aplicam às localizações de fábricas, depósitos, torres de transmissão, lojas de franquias, etc.

Os estudos de problemas de localização iniciaram-se com Alfred Weber, em 1909, que pesquisou a minimização do custo de transporte para localização de uma fábrica envolvendo três pontos fixos, sendo duas fontes de matéria-prima e um mercado consumidor (GALVÃO, 1981). A aplicação dos problemas de localização foi muito incipiente até a década de 1960. Segundo Owen e Daskin (1998), a teoria da localização foi impulsionada por algumas aplicações que inspiraram outros pesquisadores de diversos campos. Destaca-se a publicação do trabalho seminal de Hakimi (1964), que buscou localizar centros de comutação em uma rede de comunicações e delegacias de polícia em um sistema interligado de rodovias. Para isso, o autor considerou o problema de localizar uma ou mais instalações em uma rede, de modo a minimizar a distância total entre os clientes e as suas instalações mais próximas, ou para minimizar a distância máxima. Posteriormente, houve aumento expressivo no interesse pelos problemas de

localização e uma ampla literatura foi produzida para abordá-los, devido à sua importância estratégica (GALVÃO, 1981; OWEN; DASKIN, 1998; PRADO, 2007; MAPA; LIMA, 2012).

Os artigos elaborados por Owen e Daskin (1998) e Current *et al.* (2002) apresentam revisões extensas sobre diversos problemas de localização de facilidades, dentre eles o problema das p -medianas desenvolvido por Hakimi (1964). Esse é um problema clássico de localização de facilidades, consistindo na localização de p -centros (medianas) em uma rede, de modo a minimizar a soma das distâncias de cada vértice de demanda ao centro mais próximo.

Segundo Galvão (1981), é possível formular esse problema via programação binária (0 ou 1), isto é, “seja $[\xi_{ij}]$ uma matriz de alocação $[n \times n]$ tal que $\xi_{ij} = 1$ se o vértice x_j é servido por um centro localizado no vértice x_i e $\xi_{ij} = 0$, caso contrário. $\xi_{ij} = 1$ indica que uma mediana está localizada no vértice x_i ; $\xi_{ij} = 0$, caso contrário”. O autor ressalta ainda que, na ausência de economias de escala e de limites de capacidade, na solução ótima, cada vértice x_j é sempre servido pelo centro mais próximo; daí a natureza binária das variáveis ξ_{ij} .

Apresenta-se, a seguir, a formulação matemática do problema das p -medianas desenvolvido por Hakimi (1964):

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \xi_{ij} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \xi_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \xi_{ii} = p; \quad (3)$$

$$\xi_{ij} \leq \xi_{ii}, \quad i, j = 1, \dots, n \quad i \neq j \quad (4)$$

$$\xi_{ij} \in \{0,1\}, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (5)$$

em que

d_{ij} é o comprimento do caminho mínimo entre os vértices x_i e x_j .

As restrições (2) garantem que qualquer vértice (cliente) x_j seja servido por somente uma mediana (facilidade) x_i . A equação (3) restringe o número de medianas a

p . As restrições (4) asseguram que $\xi_{ij} = 1$ somente se $\xi_{ii} = 1$, ou seja, que os vértices não medianas apenas serão servidos pelas medianas da rede.

Contudo, em diversas circunstâncias, pode-se ter a situação em que as instalações possuem uma capacidade, por exemplo, demanda de matéria-prima para uma usina. De acordo com Prado (2007), quando esse tipo de condicionante estiver presente, trata-se do problema das p -medianas capacitado. A capacidade Q_i da facilidade no local i deve ser explicitada, e essa restrição substitui a restrição (4).

$$\sum_{i=1}^n q_j \xi_{ij} \leq Q_i \xi_{ii}, j = 1, \dots, n \quad (6)$$

em que

q_j é a demanda do vértice j ; e

Q_i é a capacidade de atendimento do vértice i .

Os problemas das p -medianas, capacitados ou não, são considerados de otimização combinatorial (MARTINHAGO, 2012). Segundo Hörner (2009), é muito difícil encontrar uma solução para esses problemas por meio de algoritmos exaustivos (“força bruta”), devido à explosão combinatorial (Tabela 1), o que implica grande esforço computacional. Consequentemente, eles são considerados de difícil solução e pertencem à categoria NP-difícil (*NP-hard*) (GAREY; JOHNSON, 1979).

Tabela 1 – Quantidade de soluções do problema com natureza combinatorial

| Nº de Facilidades Candidatas | Nº de Facilidades para Encontrar | Nº de Possíveis Soluções |
|------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 10 | 5 | 252 |
| 30 | 15 | 155.177.520 |
| 50 | 25 | 126.410.606.437.752 |
| 100 | 50 | $1,009 \times 10^{29}$ |
| 500 | 250 | $1,167 \times 10^{149}$ |

Fonte: adaptada de ESRI (2013).

É praticamente impossível resolver problemas de grande porte por meio de métodos exatos, sobretudo pela inviabilidade quanto ao tempo de processamento computacional. Entre os métodos exatos destacam-se as técnicas da enumeração exaustiva, a busca em árvore (*branch-and-bound* ou *tree-search*), a relaxação da programação inteira via programação linear, os métodos duais e os métodos com base

em relaxação lagrangeana (GALVÃO, 1981; MARTINHAGO, 2012). Esses métodos garantem uma solução ótima; entretanto, são de alta complexidade, o que frequentemente impede suas aplicações práticas. Logo, a solução de problemas do porte daqueles encontrados cotidianamente nos estudos de localização requer o uso de heurísticas e, ou, metaheurísticas (DIAS, 2005; BEZERRA, 2008).

As heurísticas são algoritmos exploratórios para solução de problemas de otimização combinatorial (HÖRNER, 2009). A primeira heurística para o problema das p-medianas por meio de um algoritmo de busca local (ROSING *et al.*, 1999) foi proposta por Maranzana (1964). Dong (2008) e Hörner (2009) mencionam que o método heurístico mais citado na literatura e considerado um dos melhores em termos de desempenho é o Algoritmo de Substituição de Vértices (*node substitution*), desenvolvido por Teitz e Bart (1968). Ademais, Hörner (2009) define as metaheurísticas como métodos que possuem uma estrutura com componentes genéricos, servindo aos diversos tipos de problemas de otimização. De acordo com o autor, esses métodos dividem-se em duas categorias: técnicas de busca local e de busca populacional. As técnicas de busca local começam com uma solução inicial e exploram as soluções que podem ser alcançadas em um movimento. Destacam-se as técnicas de Busca Tabu (*Taboo Search*) e de Têmpera Simulada (*Simulated Annealing*). Já as técnicas de busca populacional partem de um conjunto de soluções (população inicial) e em seguida são aplicados nesse conjunto diversos operadores para melhorar os indivíduos e gerar novos integrantes. As técnicas de Algoritmos Genéticos e Busca por Espalhamento (*Scatter Search*) são exemplos dessa categoria.

Esses métodos heurísticos e metaheurísticos são procedimentos simples, empíricos e resultam em boas soluções, porém não necessariamente ótimas. Entretanto, o que justifica a adoção dessas estratégias de solução é a produção de resultados em um tempo razoável (DIAS, 2005). Os estudos Lorena *et al.* (2001), Ranta (2005), Dong (2008), Menezes (2011), Sultana e Kumar (2012) e Mapa e Lima (2012) comprovaram a eficiência desses métodos na modelagem e solução de problemas de localização-alocação. Esses modelos integrados aos Sistemas de Informações Geográficas têm sido frequentemente adotados como ferramentas de suporte à tomada de decisão. Neste cenário, destacam-se os recursos disponibilizados na extensão *Network Analyst* do SIG ArcGIS, desenvolvido e comercializado pelo ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) (ARAKAKI, 2002; MENEZES *et al.*, 2011).

3.2 Cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)

3.2.1 Origem e classificação botânica

A cana-de-açúcar é um vegetal originário da Oceania (Nova Guiné) e da Ásia (essencialmente Índia e China). Trata-se de uma planta herbácea, cespitosa, perene e que dispõe de um mecanismo fotossintético C4 (CORTEZ *et al.*, 2013). Pertence à família Poacea (gramíneas) (CORTEZ *et al.*, 2013), do gênero *Saccharum*, com seis espécies conhecidas: *Saccharum officinarum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. edule*, *S. spontaneum* e *S. robustum* (MATSUOKA *et al.*, 1999; PALHARES; VIEIRA, 2009).

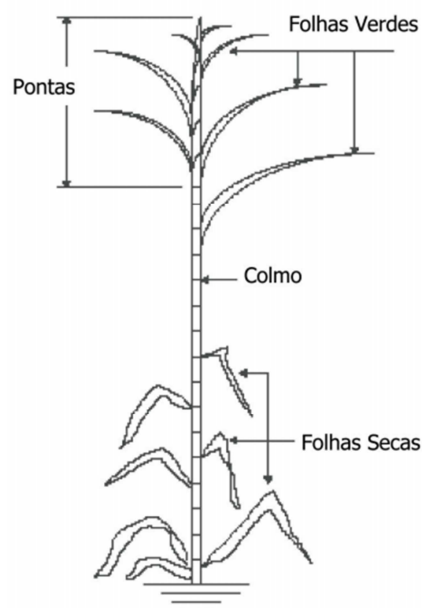
Deve-se destacar o fato de que a espécie *Saccharum officinarum*, considerada uma cana nobre devido ao alto teor de sacarose, é extremamente importante para a cultura canavieira, por ser a base para a criação de híbridos que originaram cultivares modernas (PALHARES; VIEIRA, 2009; ALMEIDA, 2010).

3.2.2 Aspectos edafoclimáticos para o plantio de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar se desenvolve melhor em solos profundos, de boa fertilidade, com alta capacidade de retenção de água, mas bem drenados, pois não suporta encharcamento (ROSETTO *et al.*, 2013). Normalmente, é necessário fazer a calagem durante o preparo do solo para o plantio dos toletes (rebolos) (VIANA *et al.*, 2013), uma vez que o pH ideal varia entre 6,0 e 6,5 (MARIN, 2013). Ademais, deve-se realizar adubação, baseando-se na análise do solo e nas exigências nutricionais da planta.

Em relação às condições climáticas para produção de cana-de-açúcar, sabe-se que a precipitação pluviométrica deve ser bem distribuída durante o ano e situar-se entre 1.200 e 1.300 mm.ano⁻¹, e a temperatura média para crescimento é de 20 a 30 °C (MME, 2007; OLIVEIRA, 2011; MARIN, 2013).

Atualmente, apenas a parte aérea da cana-de-açúcar (de 2 a 5 m, composta pelo colmo – material de maior interesse econômico – e pelas folhas) é utilizada, sendo basicamente constituída por açúcares, fibras e, em grande maioria, água (ANDRADE; CARDOSO, 2004; CORTEZ *et al.*, 2013). Na Figura 1 e na Tabela 2 estão a estrutura morfológica e a composição química da cana-de-açúcar, respectivamente.



Fonte: MME (2007).

Figura 1 – Estrutura da cana-de-açúcar.

Tabela 2 – Composição química da cana-de-açúcar madura

| Elemento | % |
|------------------------|-----------|
| Água | 64 – 75 |
| Açúcares | 12 – 18 |
| Fibras | 8 – 14 |
| Cinzas | 0,3 – 0,8 |
| Materiais nitrogenados | 0,3 – 0,6 |
| Outros | 0,6 |

Fonte: Andrade e Cardoso (2004).

3.2.3 Produção de cana-de-açúcar no Brasil

Em relação à política de produção canavieira, o governo federal destaca-se por lançar uma política nacional para nortear a expansão do cultivo sustentável da cana-de-açúcar, com base em critérios socioambientais e econômicos (MAPA, [s.d.]). Esta respaldou-se no Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar (MANZATTO *et al.*, 2009) que, por sua vez, considerou características como tipo de solo, declividade do terreno, biomas e clima, dentre outras, para estabelecer as áreas mais adequadas para o plantio canavieiro.

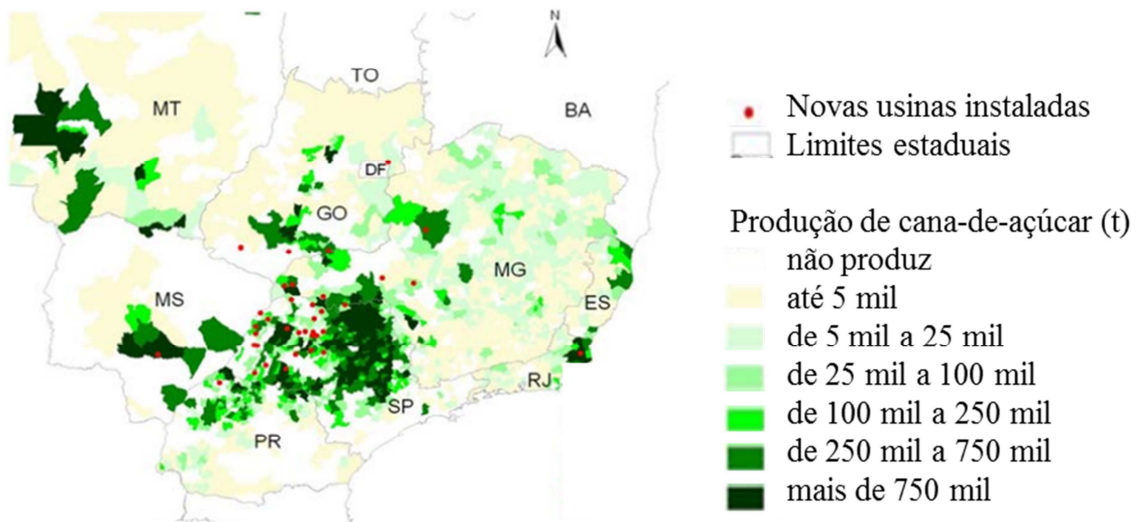
Atualmente, a área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil ocupa menos de 1 % das terras agricultáveis. Contudo, “o Brasil possui disponibilidade de terras cultiváveis para o plantio da cana, sem prejuízo [para a produção] dos outros alimentos, tecnologia de produção e a estrutura na distribuição” (MAPA, [s.d.]).

De acordo com o levantamento da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2013), em 2012 foram constatados 9,7 milhões de hectares plantados com cana, distribuídos em todos estados brasileiros. Nesse levantamento, a Região Sudeste (67,5 %) destaca-se como a maior região produtora do Brasil, sendo São Paulo o principal estado produtor (56,3 %) (Tabela 3). Essa concentração espacial no estado de São Paulo é justificada pela grande presença de usinas sucroalcooleiras e, também, em razão da lógica de implantação estratégica dessas unidades próximas aos locais de produção, o que contribui para a diminuição dos custos de produção e de logística (QUEIROZ, 2008; SARTORI, 2010).

Tabela 3 – Produção brasileira de cana-de-açúcar, em milhões de toneladas, bem como para as suas regiões e os seus estados

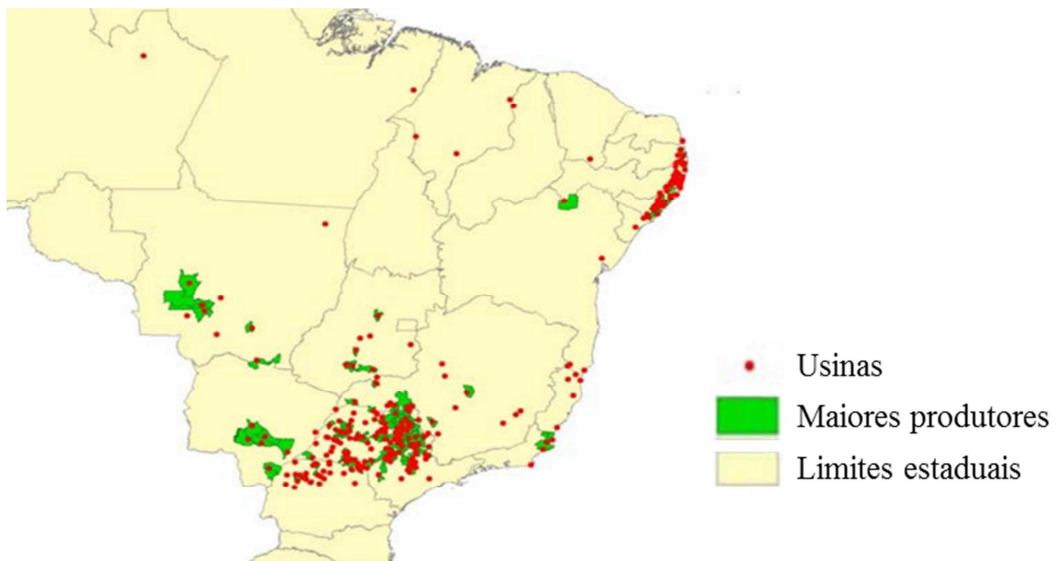
| | | | | | |
|---------------|--------------------|-------|---------------|---------------------|-------------------|
| Brasil | | 721,1 | | Espírito Santo | 4,7 |
| Região | Sudeste | 487,0 | Estado | Rio Grande do Norte | 4,3 |
| | Centro-Oeste | 113,3 | | Sergipe | 3,3 |
| | Nordeste | 68,0 | | Maranhão | 3,0 |
| | Sul | 49,4 | | Ceará | 2,0 |
| | Norte | 3,3 | | Tocantins | 1,9 |
| | | | | | Rio Grande do Sul |
| Estado | São Paulo | 406,2 | | Piauí | 0,81 |
| | Minas Gerais | 70,5 | | Pará | 0,75 |
| | Goiás | 58,3 | | Santa Catarina | 0,50 |
| | Paraná | 47,9 | | Amazonas | 0,30 |
| | Mato Grosso do Sul | 37,8 | | Rondônia | 0,22 |
| | Alagoas | 27,7 | | Acre | 0,20 |
| | Mato Grosso | 17,1 | | Distrito Federal | 0,06 |
| | Pernambuco | 14,2 | | Amapá | 0,004 |
| | Bahia | 6,9 | | Roraima | 0,001 |
| | Paraíba | 5,9 | | - | - |
| | Rio de Janeiro | 5,7 | | | |

A localização das principais áreas canavieiras brasileiras, juntamente com os projetos de instalação de novas usinas de açúcar e álcool, e a distribuição das usinas de açúcar e álcool no Brasil estão representadas na Figura 2 e na Figura 3, respectivamente.



Fonte: JBCI (2006).

Figura 2 – Distribuição dos locais planejados para novas usinas de grande porte e áreas de cana-de-açúcar nos estados do Espírito Santo, Paraná, Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro.

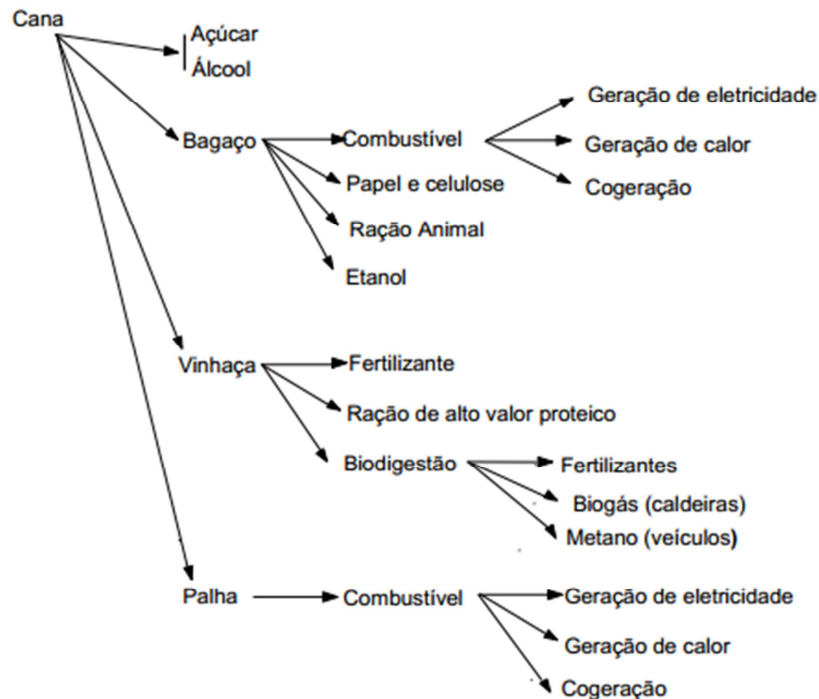


Fonte: JBCI (2006).

Figura 3 – Localização das usinas sucroalcooleiras no Brasil.

3.2.4 Bioenergia

A cana-de-açúcar é a matéria-prima para produção de açúcar, etanol e outros subprodutos, como mostra a Figura 4 (OLIVEIRA, 2011; SANTOS, 2011). Além disso, é adotada como principal cultura energética brasileira, uma vez que a planta adaptou-se



Fonte: Embrapa (2008), citada por Santos (2011).

Figura 4 – Alguns produtos e subprodutos da cana-de-açúcar.

perfeitamente ao clima e solo do País, o que resultou em alta produtividade tanto agrícola quanto energética, com potencial expansão da oferta (CORTEZ *et al.*, 2013). Segundo Sartori (2010), o cultivo canavieiro destaca-se pela tradição, relevância econômica e função energética.

Historicamente, o Brasil é um país de matrizes energéticas “limpas”. Segundo JBCI (2006), o país foi pioneiro no uso de energias renováveis em 1931, antes da Segunda Guerra Mundial, quando instituiu a obrigatoriedade de misturar etanol à gasolina. Naquele ano, o Instituto do Açúcar e Alcool (IAA) controlou a produção e administrou a exportação do açúcar e álcool, bem como efetivou a obrigatoriedade de se misturar 5 % de etanol à gasolina dos veículos.

Posteriormente, devido às crises do petróleo na década de 1970, o Brasil instituiu o Programa Nacional do Alcool (PróAlcool), pelo Decreto nº 76.593 de 14 de novembro de 1975 (BRASIL, 1975). Segundo JBCI (2006), os objetivos dessa política eram: 1) a elevação da produção de álcool combustível para substituição da gasolina; e 2) a redução das importações de petróleo. Deve-se destacar que, a princípio, cogitou-se utilizar a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) como matéria-prima para produção de etanol. Entretanto, essa alternativa não se mostrou viável, pois faltaram apoio

tecnológico e financeiro satisfatórios e, do ponto de vista econômico, seu preço era menos competitivo que o da cana-de-açúcar. Assim, a cana-de-açúcar foi a única alternativa economicamente viável que se manteve no programa (JBCI, 2006).

Durante a fase inicial do Proálcool, o governo federal subsidiou a implantação de destilarias de etanol anexas às usinas de açúcar. A segunda crise do petróleo, deflagrada pela queda do Xá Reza Pahlevi do Irã em 1979, fez com que os investimentos governamentais fossem redirecionados para estimular o estabelecimento de destilarias autônomas. Nessa época, as usinas do Centro/Sul lideravam a produção do setor sucroalcooleiro (JBCI, 2006; CGEE, 2008; SARTORI, 2010).

Em 1979, com o início da produção de veículos a álcool, aumentou a demanda de álcool hidratado como combustível, em decorrência do controle estatal sobre o preço do etanol, que foi estabelecido em 45 % do preço da gasolina. No período de 1980 a 1987, o setor sucroalcooleiro recebeu do ProÁlcool financiamentos da ordem de US\$ 8,3 bilhões para estruturar a produção do etanol (JBCI, 2006). Assim, o álcool substituiu parte considerável do consumo de gasolina, trazendo novas perspectivas e consolidando o desenvolvimento do agronegócio (CGEE, 2008).

De acordo com Andrade *et al.* (2009), após quase uma década de sucessos, a partir do final dos anos de 1980 o ProÁlcool começou a declinar, em razão da queda e da estabilização do preço do petróleo. Nessa época, os gastos do governo com subsídios e garantia da compra dos estoques de álcool pela Petrobras, objetivando sustentar os preços do etanol, atingiram níveis insustentáveis para a economia brasileira. A indústria automobilística nacional mostrava evidências de desaceleração da produção de carros a álcool. Além disso, produzir açúcar de cana-de-açúcar era a prioridade dos usineiros, uma vez que seu preço estava em alta nas bolsas internacionais. Com a eliminação da política de subvenções do governo federal, extinguiu-se também o IAA (JBCI, 2006).

O lançamento de veículos bicomustíveis (*flex-fuel*), em 2003, na esteira das discussões acerca do aquecimento global, reavivou o crescimento da produção de etanol e, conseqüentemente, do cultivo de cana-de-açúcar (SARTORI, 2010). Mais uma vez o Brasil vem se destacando no mercado internacional, tornando-se o segundo maior produtor de etanol (ANEEL, 2008).

A grande disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar produzida pelo setor possibilita usar o bagaço e a palha na produção de etanol celulósico (SANTOS *et al.*, 2013). O interesse dos pesquisadores por este tema tem aumentado muito, uma vez que a celulose é o componente químico de maior concentração na biomassa da cana-de-

açúcar: na palha, o teor de celulose varia entre 40 e 44 % enquanto, no seu bagaço, varia de 32 a 48 %. Além disso, a celulose apresenta alta eficiência na produção de etanol, quando submetida a reações de hidrólise. Assim, com as novas tecnologias, o aproveitamento integral da cana-de-açúcar poderá dobrar a produção de etanol por hectare, passando dos atuais 7.000 para 14.000 litros, sem necessidade de expansão da área plantada. Trata-se, portanto, de novos patamares de negócios para o setor (SANTOS *et al.*, 2013).

Segundo Neves *et al.* (2010), atualmente a bioeletricidade oriunda da cogeração da biomassa da cana-de-açúcar tem transformado o setor energético. Essa biomassa mostra-se apropriada para o aproveitamento na matriz energética do País e dispõe de alto potencial para aumentar a geração de energias renováveis (MME, 2007). Os três principais componentes dessa biomassa – palha, açúcar e bagaço (resíduo da fase industrial dos colmos) – representam 42,5 % do conteúdo da massa da planta, sendo o restante água (CORTEZ *et al.*, 2013). Os conteúdos energéticos desses três componentes apresentam igual proporção, totalizando cerca de 7.400 MJ por tonelada de cana-de-açúcar, como mostrado na Tabela 4 (LEAL, 2010a).

Tabela 4 – Energia da cana-de-açúcar para colmos limpos

| Componente | Quantidade (kg/t) | Energia (MJ) |
|---|--------------------------|---------------------|
| Açúcares | 150 | 2.500 |
| Fibras do colmo (bagaço) | 135 | 2.400 |
| Palha | 140 | 2.500 |
| Energia total por tonelada de cana (MJ) | - | 7.400 (0,176 tep*) |

* tonelada equivalente de petróleo.

De acordo com a ANEEL (2008), o bagaço de cana-de-açúcar é o recurso de maior potencial para geração de energia elétrica no Brasil. Leal (2010b) afirma que as fibras do colmo (bagaço) são fontes energéticas essenciais para as usinas, onde são usadas na geração de vapor e energia elétrica, apresentando uma produção média de 585 kWh por tonelada de cana.

Apesar do alto potencial energético da palha, os atuais custos de recuperação e de transporte têm inviabilizado seu uso nos ciclos de cogeração (CORTEZ *et al.*, 2013). Vale destacar que as usinas já são energeticamente autossuficientes utilizando apenas o bagaço, não havendo, assim, o aproveitamento da palha com finalidade energética. Atualmente, ela tem sido exclusivamente utilizada para proteção do solo.

Segundo Castro *et al.* (2010), a bioeletricidade vinculada à produção de etanol e, ou, de açúcar tem condições extraordinárias para alavancar a expansão do sistema elétrico nacional. A bioeletricidade pode vir a complementar a matriz energética e contribuir para a segurança energética do País, uma vez que a colheita da cana-de-açúcar no Brasil coincide com a época de estiagem, período em que o volume dos reservatórios das hidroelétricas, sobretudo nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste, encontra-se naturalmente baixo (ANEEL, 2005). Este fato torna essa alternativa ainda mais estratégica, possibilitando a conservação dos níveis dos reservatórios na estação seca e atenuando as oscilações na disponibilidade de energia elétrica ao longo do ano (ANEEL, 2008).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A região do Triângulo Mineiro foi escolhida para o desenvolvimento deste estudo por concentrar a maioria das usinas de produção de cana-de-açúcar em Minas Gerais. Essa região situa-se no extremo oeste do estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 47° 28' 52" W e 51° 02' 45" W e 18° 18' 21" S e 20° 26' 29" S (Figura 5). Composta por 35 municípios, estende-se por 53.719,5 km² e limita-se, ao norte, com o estado de Goiás; à esquerda, com o Mato Grosso do Sul; à direita, com a mesorregião Alto São Francisco, MG; e ao sul, com o estado de São Paulo (ALMG, 2013). Os três maiores municípios dessa região são Prata, com 9,04 % da área dessa mesorregião, Uberaba (8,39 %) e Uberlândia (7,66 %) e os três menores, Cachoeira Dourada (0,38 %), Fronteira (0,37 %) e Delta (0,19 %).

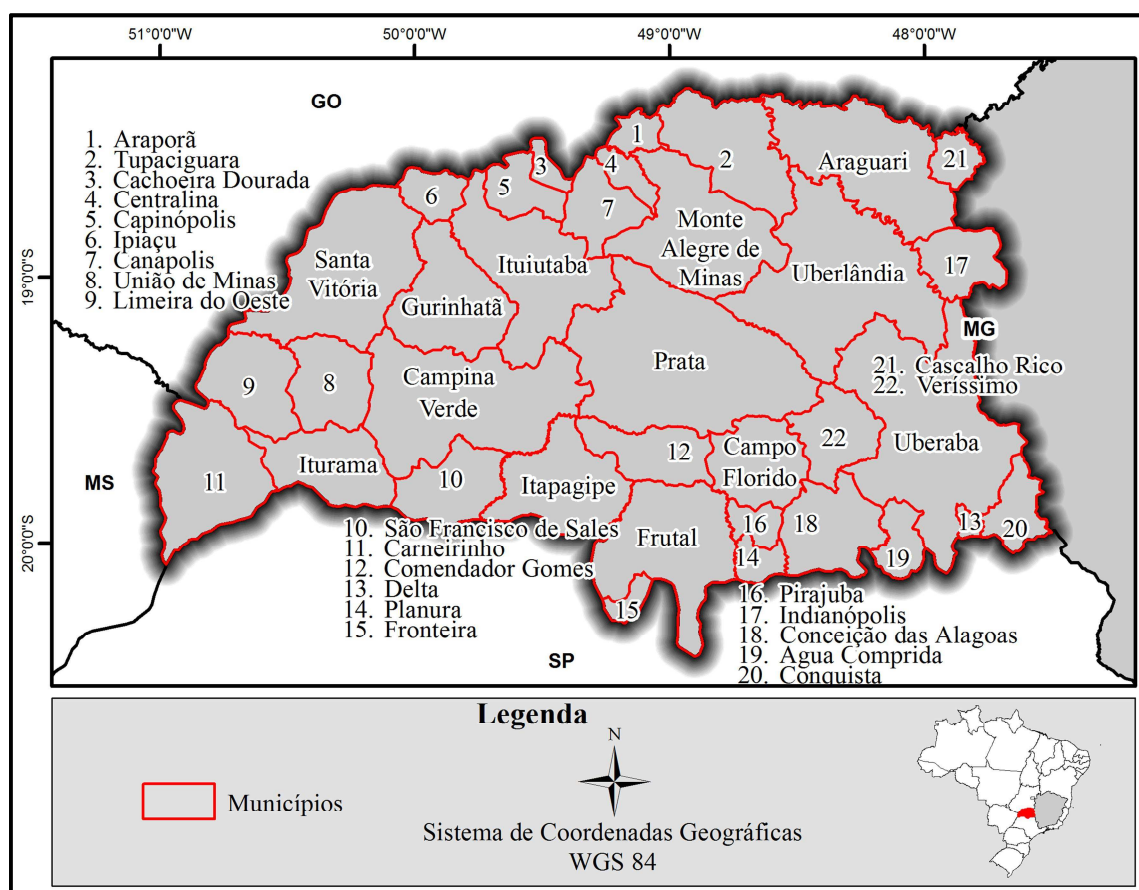


Figura 5 – Localização da área de estudo, destacando seus municípios.

A paisagem da região é predominantemente composta por formas onduladas (46,7 %) e suave-ondulada (34,5 %), devendo-se destacar que apenas 0,38 e 0,02 %

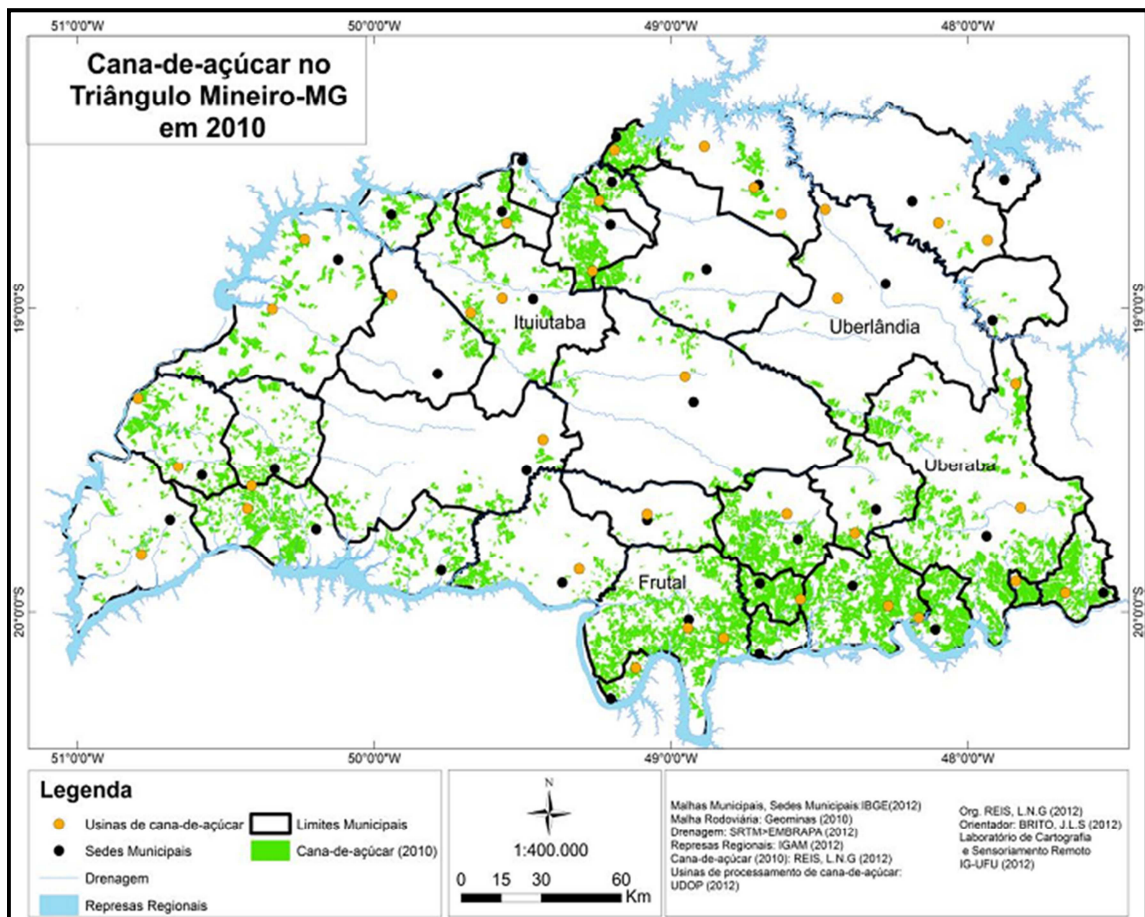
encontram-se em forma montanhosa e escarpada, conforme classificação da Embrapa (1999). A declividade média é $10 \% \pm 7,3 \%$, o que favorece a mecanização agrícola. A região, que está inserida no domínio morfoclimático do cerrado, é caracterizada por vegetação pouco densa, com troncos tortuosos e retorcidos, sendo as copas assimétricas com folhas grandes e grossas. Além disso, há grande ocorrência de veredas (ATEHORTUA, 2004; RAMOS *et al.*, 2006).

A principal característica do clima é a alternância entre duas estações bem definidas: chuvosa e seca. As maiores temperaturas médias mensais ocorrem na estação chuvosa, no período de outubro a março. A estação seca, que vai de abril a setembro, apresenta temperaturas amenas e índices pluviométricos reduzidos. A temperatura média anual varia entre 19 e 20 °C e as precipitações, entre 1.300 e 1.700 mm anuais (BRITO; REIS, 2012).

Por estar próximo aos principais mercados urbanos do País, o Triângulo Mineiro caracteriza-se como uma grande fronteira de expansão econômica (GOMES; CLEPS JR., 2006). É uma região de extremos: a agricultura de precisão, monitorada por satélites, convive ainda com a agricultura rudimentar e a pecuária extensiva (CHAGAS, 2002). Em 2010, os municípios de Uberaba (11,4 %), Conceição das Alagoas (10 %), Frutal (6,4 %), Iturama (6,2 %), Santa Vitória (5 %), Canápolis (4,9 %), Água Comprida (4,6 %) e Campo Florido (4,5 %) responderam por cerca de 53 % da produção total de cana-de-açúcar do Triângulo Mineiro (IBGE, 2013). A maioria dos municípios da região possui usinas de cana-de-açúcar estrategicamente localizadas próximas às áreas de plantio (Figura 6).

4.2 Base de dados

A base de dados vetoriais utilizada neste estudo compunha-se dos seguintes temas (Figura 7): a) Áreas de assentamentos (ANEEL, 2013), d) Áreas de plantio de cana-de-açúcar (REIS; BRITO, 2012), a) Aeródromos, c) Biomas, a) Ferrovias, b) Hidrografia, a) Linhas de transmissão, Malha municipal (Figura 5), a) Rodovias, d) Unidades de conservação de proteção integral, d) Unidades de conservação de uso sustentável (DNIT, 2013), a) Áreas urbanas, d) Minerações e Uso da terra (SISEMA, 2013).



Fonte: Reis e Brito (2012).

Figura 6 – Mapeamento das áreas de cultivo da cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro, MG, utilizando imagens digitais Rapideye.

Os **Assentamentos** (a) referem-se aos projetos de reforma agrária para obtenção de terras, denominados Projetos de Assentamentos (PA). Esses estão sob a jurisdição federal, sob a tutela do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA).

O tema **Cana-de-açúcar** (d) contém os polígonos referentes à área plantada com cana-de-açúcar em 2010. Para obtenção dessas feições, Reis e Brito (2012) empregaram a técnica de interpretação visual na tela do computador de imagens ortorretificadas *Rapideye*, cujas células possuíam 5 m de lado. Foram mapeadas quatro categorias: Cana adulta (pré-colheita), Área reformada ou Rebrota, Área com palhada (pós-colheita) e Áreas com cana jovem.

Os **Aeródromos** (a) representam somente aeródromos civis públicos em operação nos municípios de Araguari, Campina Verde, Ituiutaba, Iturama, Uberaba, Uberlândia e Frutal. A Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986, define aeródromo

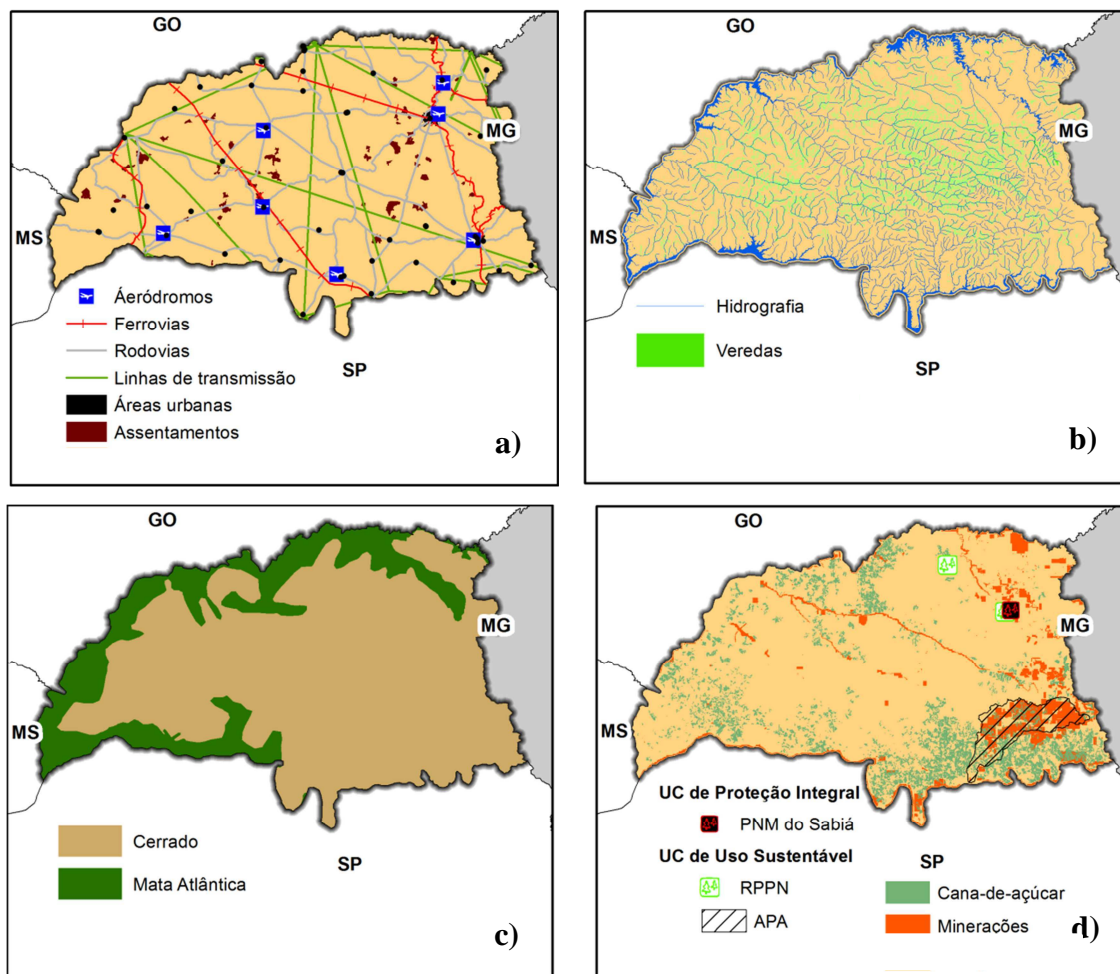


Figura 7 – Visualização dos temas vetoriais da base de dados do estudo de caso.

como toda área destinada a pouso, decolagem e movimentação de aeronaves (BRASIL, 1986).

As feições dos sistemas viários, extraídas da carta ao milionésimo produzida pelo IBGE, foram agrupadas em dois temas vetoriais: **Ferrovias** (a) e **Rodovias** (a). O tema rodovias contém vias pavimentadas, duplicadas, planejadas, em obras, etc., enquanto as ferrovias incluem a malha em uso, com tráfego suspenso, planejadas e em construção.

Os dois grupos de Unidades de Conservação (UCs) – de Proteção Integral e de Uso Sustentável – assim definidas pela Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000 (BRASIL, 2000), foram utilizados para compor as áreas com algum tipo de impedimento à implantação de usinas bioenergéticas. O Parque Municipal do Sabiá, em Uberlândia, está inserido no tema **Unidade de Conservação de Proteção Integral** (d). O tema **Unidades de Conservação de Uso Sustentável** (d) abriga duas Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) – a RPPN Fazenda Garra e a RPPN Reserva Ecológica

do Panga - em Tupaciguara e Uberlândia, respectivamente - bem como uma Área de Proteção Ambiental (APA) que intercepta os municípios de Conceição das Alagoas, Uberaba e Veríssimo.

As feições do tema **Minerações** (d) referem-se aos locais de processos cadastrados do setor mineral no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

Os **Biomass** (c) são representados por dois grupos de feições: Cerrado (predominante) e Mata Atlântica.

O **Uso da terra** representa a cobertura vegetal de Minas Gerais em 2009 (IEF, 2005). Esse mapeamento foi realizado pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF), em parceria com a Universidade Federal de Lavras (UFLA). As feições desse tema representam fragmentos de cobertura das vegetações nativas e as áreas dos reflorestamentos comerciais. As classes utilizadas no processo de classificação das imagens de satélite foram: vegetação nativa (campo, campo rupestre, campo cerrado, cerrado, cerradão, floresta submontana e floresta semimontana) e reflorestamentos (eucalipto e pinus). A classe **Outras** resulta do agrupamento das áreas de agricultura, pastagem, solo exposto, manchas urbanas e água.

A base de dados foi complementada pelos temas matriciais: a) Modelo Digital de Elevação (MDE) e b) Declividades, ilustrados na Figura 8. O MDE foi extraído da base ASTER – *Global Digital Elevation Model* (ASTER G-DEM), sendo necessárias 14 quadrículas de 1° x 1° para recobrir toda área de estudo. A segunda versão do ASTER G-DEM foi disponibilizada, gratuitamente, em 17 de outubro de 2011, para toda a superfície da Terra, por intermédio de uma parceria entre a Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA) e o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI – *Ministry of Economy, Trade and Industry*). Esse MDE possui células com 30 m de lado e é apresentado no formato GeoTIFF, com sistema de coordenadas geográficas e *datum* WGS84. A exatidão vertical estimada é de 17 m, com nível de confiança de 95 % (METI, 2013). Estas 14 quadrículas foram então mosaicadas, dando origem a um MDE contínuo para a região analisada. Em seguida, esse mosaico foi recortado com o limite da região de estudo e usado para derivar o respectivo grid de declividades. Após mosaicado, utilizou-se o comando *FILL* da extensão Spatial Analyst do *software* ArcGIS para eliminar as depressões espúrias do MDE resultante. Em seguida, aplicou-se o comando Slope para obter o tema Declividade, sendo seus valores expressos em porcentagem.

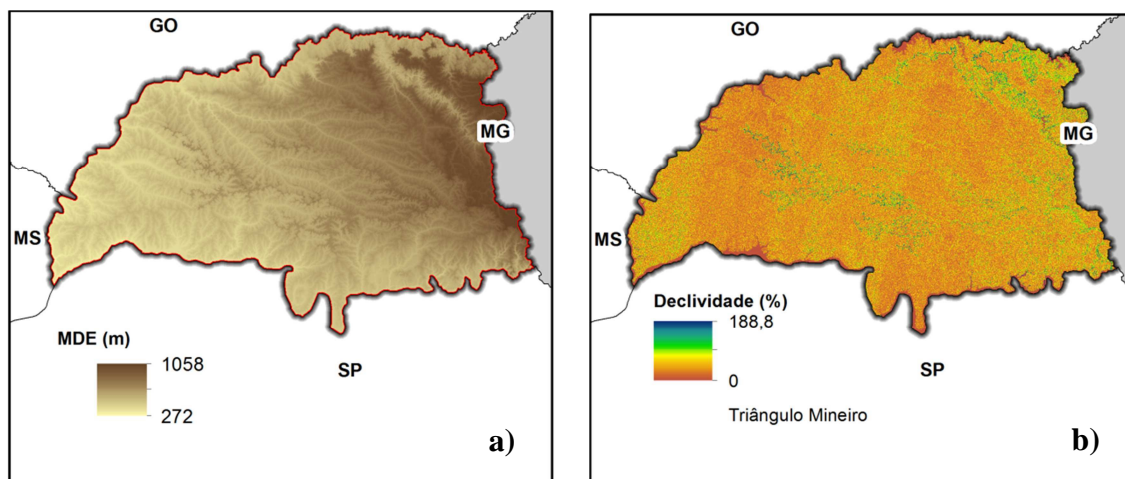


Figura 8 – Temas matriciais da base de dados.

O desenvolvimento de análises em rede, envolvendo os cálculos de distâncias e a seleção de localizações ideais das usinas, tornava imperativo a adoção de um sistema de projeção cartesiano para a base de dados. Tendo em vista que a área de estudo estendia-se por mais de uma zona UTM (*Universal Transversa de Mercator*) e a necessidade de se preservar a exatidão cartográfica, todos os temas foram projetados para o Sistema de Projeção Cônica Equivalente de Albers, que privilegia regiões com predomínio de desenvolvimento no sentido leste-oeste, utilizando-se as ferramentas *Project* e *Project Raster* disponíveis no ArcToolbox do ArcGIS. Em função dos limites geográficos do Triângulo Mineiro, adotaram-se os seguintes parâmetros para este sistema de projeção cartográfica:

- meridiano central: 49° W
- 1º paralelo-padrão: 20,10° S
- 2º paralelo-padrão: 18,65° S
- latitude de origem: 21° S
- *datum*: SIRGAS 2000

4.3 Análises espaciais

Os procedimentos de análises espaciais foram divididos em duas etapas, para melhor entendimento: 1) identificação das zonas de exclusão; e 2) identificação das zonas de aptidão e das localizações potenciais de usinas bioenergéticas.

4.3.1 Zonas de exclusão

Uma vez que nem todos os locais podem estar disponíveis para uso, as localidades com restrições absolutas para instalação de usinas bioenergéticas foram excluídas das alternativas de localização. Compuseram essas áreas, denominadas de zonas de exclusão, as feições dos seguintes temas: **Aeródromos, Áreas urbanas, Assentamentos**, áreas de plantio de **Cana-de-açúcar, Declividades (> 25 %), Ferrovias, Hidrografia, Linhas de transmissão**, áreas de **Minerações, Rodovias, Unidades de Conservação e Veredas**.

Por uma questão de segurança da navegação aérea, é proibida a utilização da área no entorno dos aeródromos. Nesse aspecto, o artigo 43 da Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986 (BRASIL, 1986), coíbe a implantação de certos empreendimentos nas proximidades dos aeródromos:

Art. 43. As propriedades vizinhas dos aeródromos e das instalações de auxílio à navegação aérea estão sujeitas a restrições especiais.

Parágrafo único. As restrições a que se refere este artigo são relativas ao uso das propriedades quanto a edificações, instalações, culturas agrícolas e objetos de natureza permanente ou temporária, e tudo mais que possa embaraçar as operações de aeronaves ou causar interferência nos sinais dos auxílios à radionavegação ou dificultar a visibilidade de auxílios visuais.

A extensão da Área de Segurança Aeroportuária (ASA), onde não são permitidas as implantações de atividades de natureza perigosa, é assim definida no artigo 1º da Resolução CONAMA nº 4, de 9 de outubro de 1995 (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.

Parágrafo único. No caso de mudança de categoria do aeródromo, o raio da ASA deverá se adequar à nova categoria.

Essa implantação de natureza perigosa é pormenorizada no parágrafo 1º, do artigo 46 da Portaria nº 1.141/GM5, de 8 de dezembro de 1987 (BRASIL, 1987):

Art. 46. [...]

§ 1º Denomina-se Implantação de Natureza Perigosa toda aquela que produza ou armazene material explosivo ou inflamável, ou cause perigosos reflexos, irradiações, fumo ou emanações, a exemplo de usinas siderúrgicas e similares, refinarias de combustíveis, indústrias químicas, depósitos ou fábricas de gases, combustíveis ou explosivos, áreas cobertas de material refletivo, matadouros, vazadouros de lixo, culturas agrícolas que atraem pássaros, assim como outras que possam proporcionar riscos semelhantes à navegação aérea.

Diante disso, as usinas bioenergéticas são consideradas empreendimentos de natureza perigosa, uma vez que produzem materiais inflamáveis que, por sua vez, são armazenados em depósitos de combustíveis. Adicionalmente, os estoques de matéria-prima e os resíduos da produção atraem frequentemente grande quantidade de pássaros. Devido à falta de informações acerca das regras de voo por instrumento (IFR) para os sete aeródromos civis públicos da região, adotou-se a maior restrição da legislação, ou seja, 20 km em torno do centro geométrico dos aeródromos. As respectivas áreas de exclusão foram geradas aplicando-se a ferramenta *buffer* aos centroides das feições do tema **Aeródromos**.

Na periferia das áreas residenciais foram criadas zonas-tampão, com 1.000 m de largura, para proteção da área urbana (SULTANA; KUMAR, 2012). Zonas de exclusão, com largura de 30 m, foram criadas ao longo das feições dos temas **Ferrovias, Rodovias e Linhas de transmissão**, evitando-se a localização de usinas bioenergéticas nestes sítios.

A Portaria MINTER nº 124, de 20 de agosto de 1980, estabeleceu normas para a localização de indústrias potencialmente poluidoras junto às coleções hídricas (BRASIL, 1980), a saber:

I – Quaisquer indústrias potencialmente poluidoras, bem como as construções ou estruturas que armazenam substâncias capazes de causar poluição hídrica, devem ficar localizadas a uma distância mínima de 200 (duzentos) metros das coleções hídricas ou cursos d'água mais próximos.

De fato, as usinas bioenergéticas, voltadas à produção de álcool, são potencialmente poluidoras, conforme a descrição da categoria “Indústria Química” do anexo VIII da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981):

Categoria: Indústria química - [...] fabricação de combustíveis não derivados de petróleo, [...], produção de álcool etílico, [...].

Logo, estabeleceu-se uma zona de exclusão com largura de 200 m ao longo das feições do tema **Hidrografia**.

O artigo 25 da Lei nº 9.985, de julho de 2000 (BRASIL, 2000), prevê que as Unidades de Conservação, exceto as categorias APA e RPPN, devem possuir uma zona de amortecimento no seu entorno. Ali, as atividades antrópicas estão sujeitas a normas e restrições específicas, com o propósito de minimizar os impactos negativos sobre as Unidades de Conservação (UC). A Resolução CONAMA nº 13, de 6 de dezembro de 1990, estabelecia a extensão de 10.000 m para a zona de amortecimento no entorno das UCs (BRASIL, 1990). Esta resolução foi revogada pela Resolução CONAMA nº 428, de 17 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010), que estabelece que, até 2015, o licenciamento de empreendimentos de significativo impacto ambiental, localizados em uma faixa de 3.000 m (*i.e.*, zona de amortecimento) a partir dos limites da UC, quando a zona de amortecimento não houver sido estabelecida no processo de sua criação, deverá ser autorizado pela autoridade responsável pela administração da UC, com parecer fundamentado em Estudo de Impacto Ambiental e no respectivo Relatório de Impacto Ambiental. Contudo, no presente estudo adotou-se a extensão de 10.000 m para definir a zona de amortecimento do Parque Natural Municipal do Sabiá, uma vez que não se estabeleceu a extensão da respectiva zona de amortecimento durante o processo de sua criação. Já para as **Unidades de Conservação de Uso Sustentável** (RPPN e APA), as respectivas zonas de exclusão foram geradas considerando-se somente os limites dos seus polígonos, em consonância com o § 2º do art. 1º da resolução CONAMA nº 428.

As veredas, segundo o inciso XI do artigo 4º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP), em zonas rurais ou urbanas (BRASIL, 2012). Desse modo, a zona de exclusão das feições do tema **Veredas** inclui, além das feições propriamente ditas, uma faixa de 50 m de largura a partir dos seus limites.

Art.4º [...]

XI – em veredas, a faixa marginal, em projeção horizontal, com largura mínima de 50 (cinquenta) metros, a partir do espaço permanentemente brejoso e encharcado.

O relevo é um dos fatores limitantes na implantação de edifícios industriais (RAMOS, 2000). Em seu estudo, o autor reclassificou a declividade em cinco categorias: < 2 %, 2 – 5 %, 5 – 10 %, 10 – 15 %, 15 – 25 % e > 25 %. Nesta última

classe, os riscos de erosão são muitos elevados, não sendo esses locais adequados à construção dos edifícios. Dong (2008) excluiu, também, áreas com declividade superior a 15^o, ou seja, cerca de 25 %, para localização de usinas de biomassa. O mesmo critério foi adotado na presente pesquisa para definir a zona de exclusão referente ao tema **Declividade**. Para identificar as áreas com declividades impróprias, usou-se a ferramenta *Reclassify* da extensão Spatial Analyst do ArcGIS.

As zonas de exclusão das feições dos temas **Assentamentos**, **Cana-de-açúcar** e **Minerações** foram construídas considerando-se só os limites de seus polígonos.

Na Tabela 5 está o resumo dos critérios adotados na definição das zonas de exclusão na região do Triângulo Mineiro.

Tabela 5 – Localidades restritas para o desenvolvimento de uma usina bioenergética

| Tema | Restrição |
|--|---------------------------|
| Aeródromos | Distância \leq 20.000 m |
| Áreas urbanas | Distância \leq 1.000 m |
| Áreas urbanas | Polígonos |
| Assentamentos | Polígonos |
| Cana-de-açúcar | Polígonos |
| Ferrovias | Distância \leq 30 m |
| Hidrografia | Distância \leq 200 m |
| Linhas de transmissão | Distância \leq 30 m |
| Minerações | Polígonos |
| Rodovias | Distância \leq 30 m |
| Unidade de Conservação de Proteção Integral – Parque Natural Municipal do Sabiá | Distância \leq 10.000 m |
| Unidade de Conservação de Uso Sustentável – Área de Proteção Ambiental (APA) | Polígonos |
| Unidade de Conservação de Uso Sustentável – Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) | Polígonos |
| Veredas | Distância \leq 50 m |

Após gerar todas as feições das zonas de exclusão, em formato vetorial, elas foram convertidas para o formato matricial (*raster*), adotando-se o tamanho de célula igual a 30 m, usando-se a ferramenta *Polygon to Raster*. Então, os valores dos *rasters* gerados foram reclassificados em números binários – zero ou 1 – por meio da ferramenta *Reclassify*. As zonas de exclusão receberam valor zero, indicando locais inadequados para implantar as usinas bioenergéticas; os locais potencialmente favoráveis à implantação, valor 1.

Por fim, a zona de exclusão final foi obtida ao multiplicar todas as zonas de exclusão de cada tema, usando-se a ferramenta *Raster Calculator*. Esta operação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$C_i = \prod_{j=1}^n c_{i,j}$$

em que

C_i é o valor booleano (0, 1) atribuído à i -ésima célula na imagem final de zona de exclusão;

$c_{i,j}$ é o valor booleano (0, 1) da i -ésima célula da j -ésima restrição; e

n é o número de restrições consideradas na análise.

4.3.2 Zonas de aptidão e localizações potenciais

As zonas de aptidão são locais potenciais para implantação de usinas bioenergéticas, sem qualquer impedimento absoluto. Neste estudo, utilizaram-se nove temas para caracterizar as regiões aptas: áreas de **Cana-de-açúcar**, **Biomass**, **Declividades**, **Uso da terra**, bem como as faixas geradas em torno das áreas urbanas, **Ferrovias**, **Hidrografia**, **Linhas de transmissão e Rodovias**.

Inicialmente, seis *rasters* de distâncias euclidianas foram produzidos a partir dos cinco últimos temas anteriores, bem como da área de plantio de **Cana-de-açúcar**, especificando-se o limite da região como a respectiva distância máxima associada a cada tema. A distância euclidiana – que é uma superfície contínua – corresponde à distância em linha reta entre os centros de duas células.

Em seguida, efetuou-se a normalização desses seis *rasters* de distâncias euclidianas, juntamente com a do tema **Declividades**. A normalização possibilita que critérios com faixas de valores e, ou, unidades distintas e, portanto, não comparáveis entre si, sejam convertidos para um mesmo intervalo de valores. Ademais, esta operação permite a agregação dos critérios (RAMOS, 2000; ZAMBON *et al.*, 2005). A função mais simples e mais comumente utilizada é a linear crescente, definida pela expressão (ZAMBON *et al.*, 2005):

$$X_i = \frac{R_i - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} * IN$$

em que

X_i é o resultado da normalização, i.e., o valor normalizado;

R_i é o valor a ser normalizado;

R_{min} é valor mínimo para o i -ésimo critério;

R_{max} é valor máximo para o i -ésimo critério; e

IN é a amplitude dos valores normalizados; no presente caso, 10.

As normalizações foram realizadas empregando-se funções de pertinência lineares decrescentes – exceto para o tema **Áreas urbanas**, cuja função foi crescente –, utilizando-se os recursos da ferramenta *Raster Calculator*. Quanto mais próxima a 10, maior é a aptidão do local.

As regiões próximas a áreas de **Cana-de-açúcar** receberam 30.000 m como valor máximo para a normalização. Essa é a situação economicamente ideal para a distância dos plantios de cana-de-açúcar à usina. Ultrapassada essa distância econômica do plantio à usina, os custos de transporte, somados ao custo de produção do etanol, tornam-se inviáveis (MIRANDA; CAVALLI, 2013).

A declividade do relevo é um critério de alta relevância, visto que uma área plana é mais vantajosa do que uma área declivosa para a localização de uma usina bioenergética. Ramos (2000) desaconselha a localização de áreas industriais em regiões com declividades acima de 15 ° (~25 %), sendo somente permitida se não houver outras opções mais econômicas. Para o presente estudo, o valor máximo permitido para a normalização da **Declividade** foi 25 %. A partir deste limiar, atribuiu-se o valor zero.

As distâncias das feições do tema **Hidrografia** foram normalizadas adotando-se o valor máximo de 5.000 m (APAWOOTICHAJ, 2001; KOIKAI, 2008). A partir desse valor a célula do *raster* de saída recebeu zero. A proximidade da rede hidrográfica é vantajosa para as usinas, que necessitam de água no processo industrial, possibilitando ainda a irrigação dos plantios de cana-de-açúcar, muito embora ainda este uso seja incipiente no Brasil (QUEIROZ, 2008).

Os modais **Ferrovias** e **Rodovias** foram definidos com os seguintes valores máximos nas suas normalizações: 20.000 e 3.500 m, respectivamente, conforme Ramos (2000). As ferrovias ganham destaque para transportar o etanol até os portos de Santos ou de São Sebastião (SACANDIFFIO, 2010). Essa infraestrutura para escoamento do álcool é atraente para a implantação de uma usina, mesmo a uma maior distância (QUEIROZ, 2008). Entretanto, a fácil acessibilidade às rodovias foi importante para

92 % das indústrias sucroalcooleiras pesquisadas por Behaine (2012), haja vista que este modal é o mais utilizado no Brasil (SACANDIFFIO, 2010). Por isso, adotou-se um menor valor máximo para as rodovias.

O valor de 72.000 m para a maior distância euclidiana entre linhas de transmissão foi obtido aplicando-se o comando *Euclidean Distance* da extensão *Spatial Analyst* e usado para a normalização do tema **Linhas de transmissão**, uma vez que centrais de bioeletricidade anexas às usinas localizam-se, em sua maior parte, em pontos muito distantes das redes existentes. Contudo, a proximidade da localização de usinas com relação à rede elétrica favorece a venda do excedente de energia. Assim, distâncias menores que 1.000 m não requerem a construção de subestações. Acima disto, é necessário construir subestações para transformar a tensão, o que aumenta o custo da rede (QUEIROZ, 2008; BEHAINE, 2012).

As **Áreas urbanas** foram definidas com valor máximo de 5.000 m (APAWOOTICHAI, 2001), em função crescente. Portanto, quanto mais longe da área urbana maior a aptidão do local, uma vez que se atenuam os impactos de sua implantação sobre os moradores.

Os temas **Biomass** e **Uso da terra** correspondem aos atributos qualitativos. As células de uma mesma categoria possuem o mesmo valor de atributo. Deste modo, foram indicados valores entre 0 e 10 para cada tipo de bioma ou de uso da terra, o que reflete o nível de aptidão de um determinado valor de atributo para a implantação de usinas.

O tema **Biomass** continha duas classes: Cerrado e Mata Atlântica. Esta recebeu pontuação com valor 5, enquanto o Cerrado recebeu valor 10. A Mata Atlântica recebeu uma pontuação menor devido à Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, que restringe a utilização e aumenta a proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica (BRASIL, 2006), condicionando os empreendimentos a licenciamentos ambientais mais rigorosos.

O tema **Uso da terra** continha três classes: vegetação nativa, reflorestamento e “outras”. A classe “outras” recebeu valor 10 para implantar as usinas, enquanto a vegetação nativa e reflorestamento foram assinaladas com os valores 5 e 6, respectivamente. A vegetação nativa correspondeu ao menor valor, pois priorizou-se a conservação ambiental. Analogamente, áreas de reflorestamento não são tão interessantes para implantar a usina, pela ocupação da terra com culturas de ciclo mais longo e quase sempre pertencentes a grandes empreendimentos. Assim,

atribuiu-se um maior valor de aptidão à classe “outras”, que engloba áreas de agricultura, pastagem e solo exposto.

O processo multicriterial usado foi o *Weighted Linear Combination* (WLC) ou Combinação Linear Ponderada. O WLC tem como vantagem a capacidade de atribuir distintos pesos aos critérios, que indicam a sua importância relativa. Atribuiu-se o peso de cada critério por meio do Processo Analítico Hierárquico (AHP), desenvolvido por Saaty (1970), perante uma escala de referência variando entre 1 e 9, em que 1 representa igual importância; 3 – pequena importância; 5 – importância grande; 7 – importância muito grande; e 9 – importância absoluta (MAGALHÃES, 2011). Estes pesos foram atribuídos pelo meio de uma matriz recíproca [n × n], em que as linhas e colunas correspondem aos critérios adotados para o problema e a diagonal principal recebe valor 1. A relação entre o índice de consistência (IC) e o índice aleatório (*random*) (IR) é chamada de razão de consistência (RC), que deve ser menor que 0,10 (SAATY, 1991). Esta razão permite avaliar o grau de violação da proporcionalidade e transitividade dos julgamentos. Logo, se não for aceitável, deverá ser melhorada e corrigida. Os pesos atribuídos no modelo de aptidão são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Peso assinalado a cada critério

| Critério | Peso | Critério | Peso |
|------------------------------------|-------------|-----------------|-------------|
| Áreas de plantio de cana-de-açúcar | 0,4247 | Hidrografia | 0,0570 |
| Ferrovias | 0,1322 | Uso da terra | 0,0398 |
| Rodovias | 0,1205 | Declividades | 0,0346 |
| Áreas urbanas | 0,1078 | Biomassas | 0,0171 |
| Linhas de transmissão | 0,0663 | - | - |

Para executar o WLC, cada critério normalizado foi multiplicado pelo seu respectivo peso, usando a ferramenta *Raster Calculator*. Posteriormente, o resultado foi multiplicado pelas zonas de exclusão, produzindo assim o modelo de aptidão do Triângulo Mineiro. Este processo é descrito pela seguinte expressão (ZAMBON *et al.*, 2005):

$$S = \sum_{i=1}^k w_i x_i \prod_{j=1}^n C_{i,j}$$

em que

S é o valor final de preferência da zona de aptidão;

w_i é o peso do vetor para o i-ésimo critério;

x_i é o valor da célula normalizada do i -ésimo critério;

C_{ij} é o valor booleano (0, 1) atribuído à i -ésima célula da j -ésima zona de exclusão;

k é o número de critérios considerados na análise da zona de aptidão; e

n é o número de restrições consideradas na análise da zona de exclusão.

Os valores obtidos para o modelo de aptidão foram então reclassificados em cinco classes (Muito baixa, Baixa, Média, Alta e Muito alta), empregando-se o método *Natural Breaks (Jenks)*, disponível na ferramenta *Reclassify* da extensão *Spatial Analyst*. Em seguida, o *raster* resultante passou por um refinamento, utilizando-se uma rotina computacional especificamente desenvolvida para essa finalidade, no ambiente de programação visual *Model Builder* do ArcGIS e exportada para linguagem Python, como pode ser visualizado no Apêndice A. Esse pós-tratamento removeu pequenas regiões isoladas, contendo menos do que 50 células da imagem do modelo de aptidão. As ferramentas *Region Group*, *Boundary clean*, *Extract by attributes* e *Nibble* da extensão *Spatial Analyst* foram utilizadas nesse procedimento.

Por fim, outra rotina foi desenvolvida para realizar a seleção das células associadas aos locais mais aptos e então convertê-las em pontos dos locais potenciais a receberem as usinas (Apêndice B). Assim, os grupos com áreas contínuas superiores a 50.000 m² (cerca de 55 células) e classe de aptidão Muito Alta foram extraídos e convertidos para polígonos, utilizando-se, respectivamente, as ferramentas *Extract by attributes* e *Raster to Polygons* da extensão *Spatial Analyst*. Em seguida, determinaram-se os centroides (pontos) desses polígonos, empregando-se a ferramenta *Feature to Point*.

4.4 Modelo de localização-alocação

A localização ideal de usinas bioenergéticas foi solucionada modelando-a como um problema de localização-alocação (*location-allocation*), tendo como objetivo encontrar os locais ideais de p instalações com demandas previamente conhecidas, de tal modo que se minimizasse a soma das distâncias entre os pontos de oferta de cana-de-açúcar e as usinas bioenergéticas. O problema em questão foi resolvido utilizando-se a opção *Maximize Capacitated Coverage* do módulo *Location-Allocation* disponível na extensão *Network Analyst* do software ArcGIS. O algoritmo disponível no ArcGIS

combina várias técnicas, adotando uma heurística de substituição de vértices e uma metaheurística de refino para alcançar uma boa solução, ótima ou próxima a ela (SULTANA; KUMAR, 2012).

Nesta parte, necessitaram-se das informações acerca dos locais potenciais, dos pontos de oferta de cana-açúcar e da malha rodoviária.

As áreas de cana-de-açúcar foram representadas por grandes polígonos contíguos, que são problemáticos para o processo de otimização, uma vez que reduzem significativamente a quantidade de locais de oferta e tornam difíceis a identificação e destinação à malha rodoviária. Para contornar este problema, os pontos de oferta foram definidos como os **centroides** da interseção entre as feições do tema **área de plantio de Cana-de-açúcar** e uma grade contendo polígonos de 1.000 x 1.000 m, criada com a ferramenta *Fishnet*, disponível no ArcToolbox, o que permitiu discretizar as zonas de aptidão em áreas de 1 km² (Figura 9). A interseção dessa grade com as áreas de cana-de-açúcar gerou um atributo de área variável, em hectares (ha), para cada ponto de oferta (centroide). Este tem, como unidade, toneladas (t) de cana-de-açúcar, resultante da multiplicação do valor da produtividade média de 83,8 t.ha⁻¹, em 2010, para esta cultura no Triângulo Mineiro, (IBGE, 2013), pelo valor da área (ha) de cada polígono da interseção.

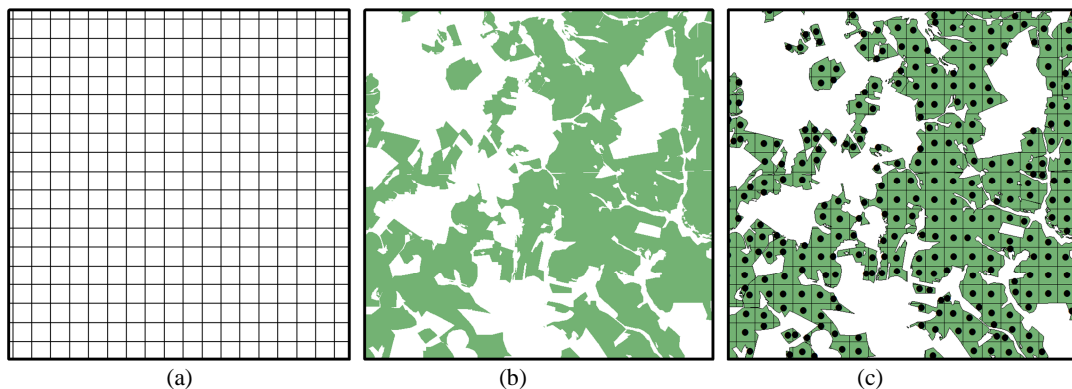


Figura 9 – Discretização em áreas menores. a) grade de 1.000 x 1.000 m; b) área de cana-de-açúcar; e c) interseção entre a e b, destacando os seus centroides.

Em seguida, desenvolveram-se vários cenários para a instalação de usinas bioenergéticas. Inicialmente considerou-se a instalação de apenas uma única usina de grande porte, com capacidade de demanda de 24Mt/ano, equivalendo a cerca de 50 % da produção de cana-de-açúcar do Triângulo Mineiro. Posteriormente, foram exploradas outras possibilidades, implantando-se de forma crescente 30 usinas na região,

consumindo sempre 50 % da produção da matéria-prima. A capacidade de processamento de cada usina implantada reduziu-se, dividindo a oferta de cana-de-açúcar (24 Mt/ano) pelo número de usinas instaladas. Assim, no segundo cenário implantaram-se duas usinas, cada uma com capacidade de 12 Mt/ano; e, no terceiro cenário, três usinas com capacidade de 8 Mt/ano. Por fim, resolveu-se o problema de localização-alocação para 30 usinas, cada uma delas com capacidade de 0,8 Mt/ano.

4.5 Fluxograma geral da metodologia

A metodologia foi resumida em um único fluxograma, no qual aborda-se todo o procedimento executado (Figura 10). As etapas anteriormente descritas resultaram nesse modelo de localização, que foi então estruturado por níveis e implementando em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

4.6 Softwares

O Sistema de Informações Geográficas ArcGIS[®], versão 10.2, foi utilizado para realização deste trabalho. As bases de dados ficaram armazenadas em uma geobase, estrutura nativa do ArcGIS. As extensões *Spatial Analyst* e *Network Analyst* deste *software* foram empregadas nas estruturações das bases de dados, nas edições das feições e no desenvolvimento das análises de redes e das análises espaciais.

A planilha eletrônica Microsoft Excel 2010 foi utilizada para implementar o Processo Analítico Hierárquico (AHP), usado na determinação dos pesos de cada critério.

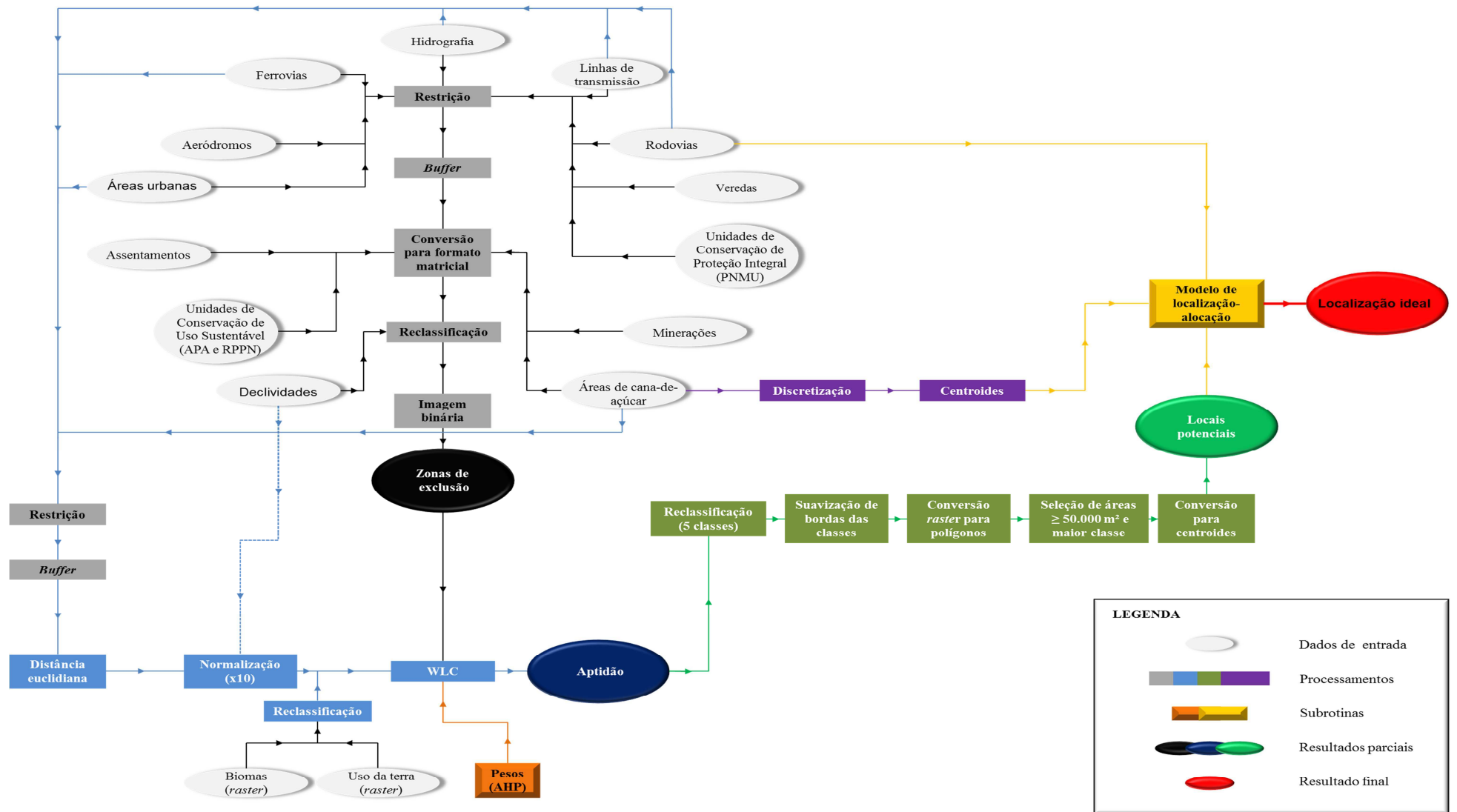


Figura 10 – Fluxograma geral do processo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Zonas de exclusão

O estabelecimento de zonas de exclusão é uma etapa inerente à modelagem espacial dos problemas de localização-alocação, permitindo suprimir áreas impróprias ao desenvolvimento da solução. A identificação dessas áreas deve preceder às demais etapas da análise espacial, reduzindo o volume de dados analisados e, conseqüentemente, o tempo para obter a solução ótima (RAMOS, 2000; DONG, 2008; SULTANA; KUMAR, 2012). Na Figura 11 apresentam-se as zonas de exclusão criadas para o problema de localização de usinas bioenergéticas na região do Triângulo Mineiro. A identificação dessas áreas baseou-se na espacialização das restrições absolutas previamente estabelecidas. De modo geral, no que se refere ao uso da terra, certos locais poderão ser considerados impróprios para instalação de determinados tipos de empreendimentos, o que resulta na exclusão dessas áreas na solução do problema de localização-alocação (RAMOS, 2000).

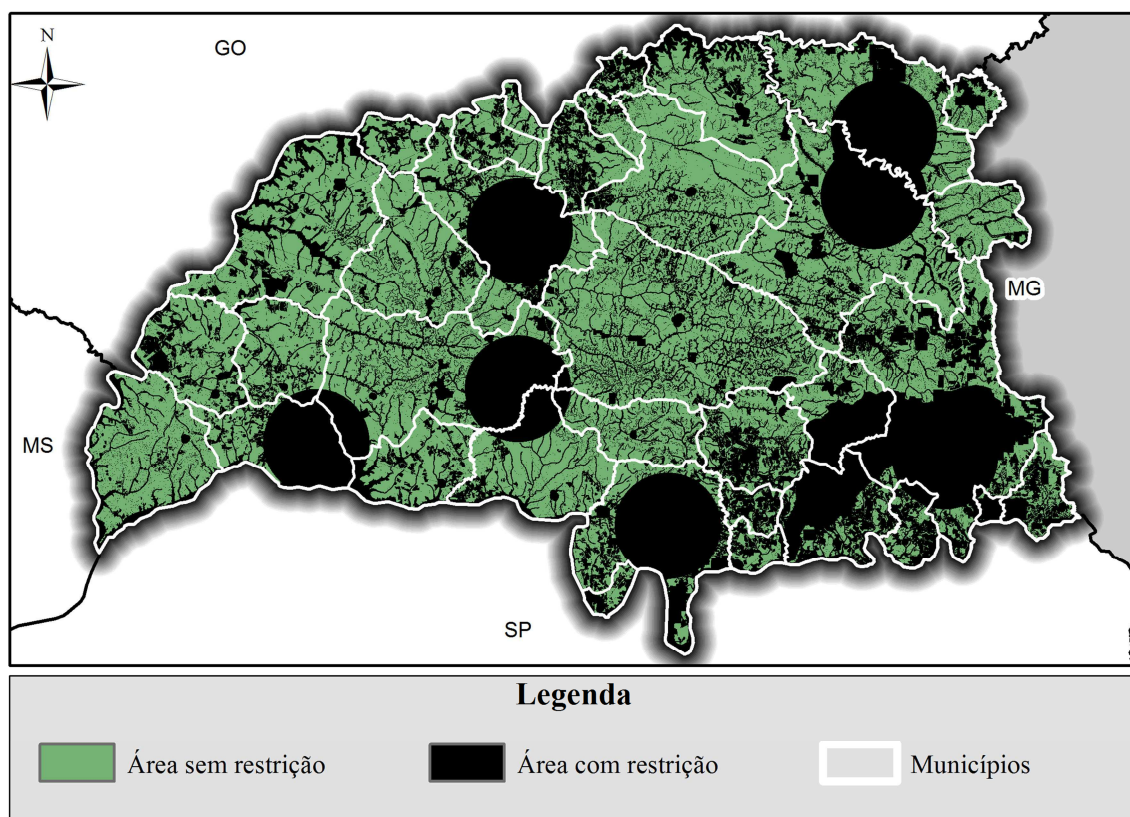


Figura 11 – Zonas de exclusão para a região do Triângulo Mineiro.

Na Tabela 7 estão os valores encontrados para as áreas com restrições e seus respectivos valores percentuais, para cada um dos temas analisados, na região do Triângulo Mineiro.

Tabela 7 – Áreas com restrição para cada tema no Triângulo Mineiro

| Tema | Área com Restrição (km²) | % em Relação à Área Total |
|--|--|----------------------------------|
| Aeródromos | 8.387,5 | 22,5 |
| Hidrografia | 7.289,5 | 19,6 |
| Área de plantio de cana-de-açúcar | 6.369,5 | 17,1 |
| Minerações | 4.466,5 | 12,0 |
| Veredas | 3.939,3 | 10,6 |
| Unidade de Conservação de Uso Sustentável – Área de Proteção Ambiental (APA) | 2.397,6 | 6,4 |
| Declividade superior a 15 % | 1.970,0 | 5,3 |
| Assentamentos | 948,8 | 2,5 |
| Áreas urbanas | 786,0 | 2,1 |
| Unidade de Conservação de Proteção Integral – Parque Natural Municipal do Sabiá | 371,1 | 1,0 |
| Rodovias | 196,9 | 0,5 |
| Linhas de transmissão | 106,3 | 0,3 |
| Ferrovias | 47,3 | 0,1 |
| Unidade de Conservação de Uso Sustentável – Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) | 2,3 | 0,0 |
| Total | 37.278,6 | 100,0 |

As restrições associadas a esses seis temas – **Aeródromos** (22,5 %), **Hidrografia** (19,6%), **Área de plantio de cana-de-açúcar** (17,1 %), **Minerações** (12 %), **Veredas** (10,6 %), **APA** (6,4 %) – representaram cerca de 90 % da área total das zonas de exclusão. Aquelas associadas aos seguintes temas apresentaram a menor participação relativa, ocupando cerca de 1 % da extensão territorial das zonas de exclusão: **Rodovias** (0,528 %), **Linhas de transmissão** (0,285 %), **Ferrovias** (0,127 %), **Unidades de Conservação de Uso Sustentável – Reservas Particulares do Patrimônio Natural** (0,006 %).

Na Tabela 8 apresentam-se os valores encontrados para as áreas com restrições e as áreas sem restrição para cada um dos municípios do Triângulo Mineiro.

De modo geral, as zonas de exclusão ocuparam uma parcela considerável da área de cada município da região. Dos 35 municípios do Triângulo Mineiro, 18 tiveram mais

Tabela 8 – Áreas com e sem restrição para cada município do Triângulo Mineiro

| Município | Área (km ²) | | | % em relação à “Área com restrição” com a “Área Total” | % em relação à “Área sem restrição” com a “Área Total” |
|---------------------------|-------------------------|------------------|-----------------|---|---|
| | Com Restrição | Sem Restrição | Total | | |
| Delta | 101,5 | 3,0 | 104,5 | 97,1 | 2,9 |
| Conceição das Alagoas | 1.135,7 | 211,3 | 1.347,0 | 84,3 | 15,7 |
| Frutal | 1.915,3 | 515,5 | 2.430,8 | 78,8 | 21,2 |
| Iturama | 1.075,9 | 326,9 | 1.402,8 | 76,7 | 23,3 |
| Araporã | 220,7 | 78,6 | 299,4 | 73,7 | 26,3 |
| Água Comprida | 360,0 | 129,9 | 489,9 | 73,5 | 26,5 |
| Pirajuba | 235,7 | 96,0 | 331,6 | 71,1 | 29,0 |
| Veríssimo | 716,9 | 311,1 | 1.027,9 | 69,7 | 30,3 |
| Uberaba | 3.123,6 | 1.387,9 | 4.511,5 | 69,2 | 30,8 |
| Fronteira | 129,9 | 68,2 | 198,0 | 65,6 | 34,4 |
| Ituiutaba | 1.649,6 | 937,5 | 2.587,1 | 63,8 | 36,2 |
| Araguari | 1.716,2 | 1.015,1 | 2.731,4 | 62,8 | 37,2 |
| Conquista | 386,9 | 230,2 | 617,1 | 62,7 | 37,3 |
| Planura | 197,7 | 119,9 | 317,6 | 62,2 | 37,8 |
| Cascalho Rico | 199,1 | 167,8 | 366,8 | 54,3 | 45,7 |
| Campo Florido | 658,5 | 605,2 | 1.263,7 | 52,1 | 47,9 |
| Uberlândia | 2.140,5 | 1.977,1 | 4.117,6 | 52,0 | 48,0 |
| Campina Verde | 1.854,3 | 1.807,9 | 3.662,3 | 50,6 | 49,4 |
| Canápolis | 420,1 | 425,3 | 845,4 | 49,7 | 50,3 |
| Cachoeira Dourada | 88,5 | 113,2 | 201,6 | 43,9 | 56,1 |
| Ipiacaçu | 204,8 | 264,2 | 469,0 | 43,7 | 56,3 |
| Capinópolis | 261,8 | 360,8 | 622,6 | 42,0 | 58,0 |
| Itapagipe | 714,1 | 1.080,5 | 1.794,5 | 39,8 | 60,2 |
| Centralina | 127,6 | 193,9 | 321,4 | 39,7 | 60,3 |
| Limeira do Oeste | 512,0 | 807,0 | 1.319,1 | 38,8 | 61,2 |
| Tupaciguara | 702,2 | 1.126,0 | 1.828,2 | 38,4 | 61,6 |
| São Francisco de Sales | 426,6 | 703,6 | 1.130,2 | 37,7 | 62,3 |
| Santa Vitória | 1.047,3 | 1.957,4 | 3.004,7 | 34,9 | 65,1 |
| Prata | 1.594,7 | 3.261,2 | 4.855,9 | 32,8 | 67,2 |
| União de Minas | 373,0 | 776,6 | 1.149,6 | 32,4 | 67,6 |
| Indianópolis | 265,1 | 568,9 | 834,0 | 31,8 | 68,2 |
| Comendador Gomes | 331,1 | 711,0 | 1.042,1 | 31,8 | 68,2 |
| Carneirinho | 639,4 | 1.419,8 | 2.059,1 | 31,1 | 68,9 |
| Gurinhata | 506,9 | 1.337,2 | 1.844,2 | 27,5 | 72,5 |
| Monte Alegre de Minas | 638,9 | 1.952,0 | 2.590,9 | 24,7 | 75,3 |
| Total | 26.672,0 | 27.047,6 | 53.719,5 | 49,7 | 50,3 |

da metade de suas áreas classificadas como impróprias para implantação de usinas bioenergéticas (Tabela 8). O município de Delta apresentou a maior porcentagem de áreas restritas, com 97,1 %, seguido de Conceição das Alagoas (84,3 %), Frutal (78,8 %) e Iturama (76,7 %), porque grande parte das suas terras é destinada ao **Plantio de cana-de-açúcar**. Além disso, o município de Delta possui uma grande área de **Mineração** e Conceição das Alagoas, uma **Área de Proteção Ambiental**. Já em Iturama e em Frutal as margens em torno dos **Aeródromos** ocupam uma parcela considerável de seus territórios.

Gurinhata e Monte Alegre de Minas foram os municípios que tiveram as menores zonas de exclusão, com 27,5 e 24,7 % de seus territórios, respectivamente, incluídos nessa categoria. Contribuíram para esse fato as pequenas áreas das feições com restrição, salvo as do tema **Declividade**, e as áreas de preservação permanente em torno das feições do tema **Veredas**, encontradas em ambos os municípios.

Os resultados apresentados na Tabela 7 e na Tabela 8 apontam que a área total dos temas com restrições (37.278,6 km²), quando considerados individualmente, difere em 10.606,6 km² do valor efetivo da área da zona de exclusão da região (26.672,0 km²). Essa diferença refere-se às áreas onde há sobreposições das diferentes zonas de exclusão. A ocorrência dessa sobreposição é normal e muito frequente. Assim, é incorreto utilizar o valor total apresentado na Tabela 7 para expressar a extensão real das áreas impróprias à instalação dos empreendimentos, devendo-se adotar, obrigatoriamente, o valor expresso na Tabela 8.

Como pode ser depreendido da análise da Tabela 8, cerca de metade (49,7 %) da área do Triângulo Mineiro é inadequada para implantação de usinas bioenergéticas. Esse valor é compatível com os resultados obtidos por Sultana e Kumar (2012), que determinaram elevadas proporções de zonas de exclusão (cerca 62 %) para instalação de usinas de bioenergia na Província de Alberta, Canadá.

5.2 Locais potenciais para implantação de usinas bioenergéticas

Na análise de preferência, nove critérios (**Áreas de plantio de cana-de-açúcar**, **Áreas urbanas**, **Bioma**, **Declividade**, **Ferrovias**, **Hidrografia**, **Rodovias**, **Linhas de Transmissão** e **Uso da terra**) foram ponderados para produzir um índice de aptidão usado para identificar locais potenciais. Sua distribuição espacial é apresentada na

Figura 12. Para avaliar a consistência dos pesos assinalados aos critérios, calculou-se a razão de consistência (RC), tendo-se obtido um valor igual a 0,07, o que indica que os valores foram aceitáveis, uma vez que o RC é inferior a 0,1 (SAATY, 1991).

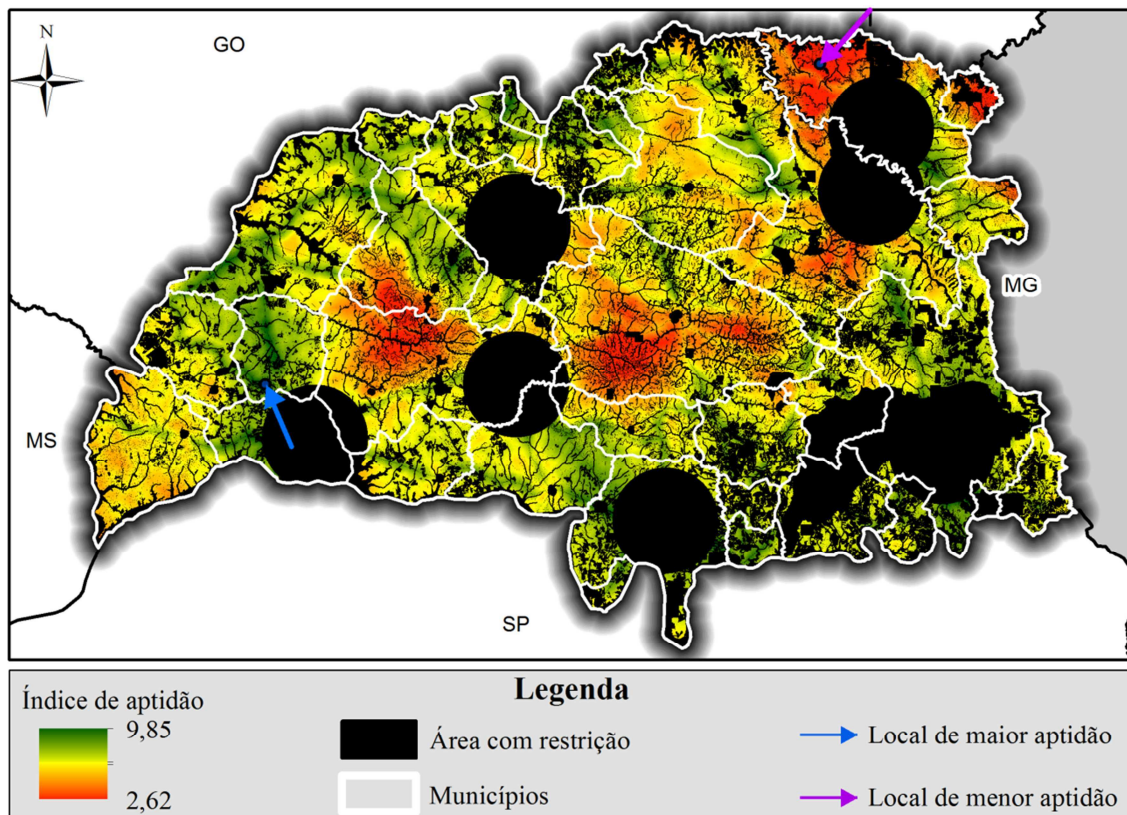


Figura 12 – Espacialização do Índice de Aptidão para a localização de usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro.

O índice de aptidão assim derivado apresentou média de 6,63, com desvio-padrão igual a 1,02. Na legenda da Figura 12 observa-se que nenhuma célula recebeu um índice de aptidão igual a 10 (valor máximo), pois o maior valor foi igual a 9,85. Tampouco identificou-se qualquer célula com índice de aptidão igual a zero (valor mínimo). Uma consulta por atributos, realizada no ArcGIS, permitiu identificar que o local de maior aptidão situa-se no município de União de Minas (seta azul) e que o município de Araguari (seta roxa) contém o local com menor índice de aptidão, *i.e.*, 2,62.

A apresentação desses resultados de forma contínua, em que cada célula com 30 m de lado possui um dado valor de aptidão, torna impraticável a utilização dessa superfície de resposta para selecionar os locais mais apropriados para instalação de usinas bioenergéticas. Exige-se, além da aptidão, uma área mínima para implantação da respectiva infraestrutura. Assim, utilizando-se a ferramenta *Reclassify* da extensão

Spatial Analyst do ArcGIS, discretizou-se o índice de aptidão apresentado na Figura 12, agrupando-se seus valores em cinco classes, pelo método de Jenks (ou método de quebras naturais), que maximiza as diferenças entre classes, enquanto minimiza as variações dos valores dentro de uma mesma classe (ESRI, 2013). As classes assim definidas possuíram os seguintes intervalos (Tabela 9):

Tabela 9 – Reclassificação do índice de aptidão pelo método de Jenks

| Classe de Aptidão | Intervalo |
|-------------------|-------------------------|
| 1 (Muito baixa) | $\leq 4,89$ |
| 2 (Baixa) | 4,89 \rightarrow 5,96 |
| 3 (Média) | 5,96 \rightarrow 6,76 |
| 4 (Alta) | 6,76 \rightarrow 7,55 |
| 5 (Muito alta) | $> 7,55$ |

Analisando, visualmente, os resultados dessa reclassificação, observaram-se algumas áreas com pequenos grupos isolados de células, conferindo-lhe um aspecto granuloso, semelhante à textura conhecida como “sal e pimenta”. Esses efeitos são bastante comuns nos procedimentos de classificação digital de imagens de satélite (PASSO, 2013). A etapa de pós-tratamento incorporou, às regiões vizinhas, grupos isolados contendo menos que 50 células, e acentuou os limites entre as classes, generalizando a superfície de resposta em relação à sua reclassificação, livrando, assim, de detalhes desnecessários para uma análise mais geral. Apresentam-se, na Figura 13, os resultados dessas operações para uma dada região.

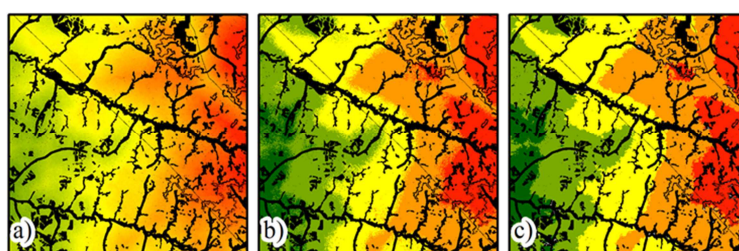


Figura 13 – Exemplo de pós-processamento do índice de aptidão: a) índice de aptidão original, b) reclassificação em 5 classes e c) refinamento.

A generalização acarretou alteração no número de células de cada classe. A Figura 14 ilustra a distribuição espacial das cinco classes de aptidão para instalação de usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro, após os refinamentos descritos.

Na Figura 15 está a área total de cada uma das cinco classes disponíveis para a localização de usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro.

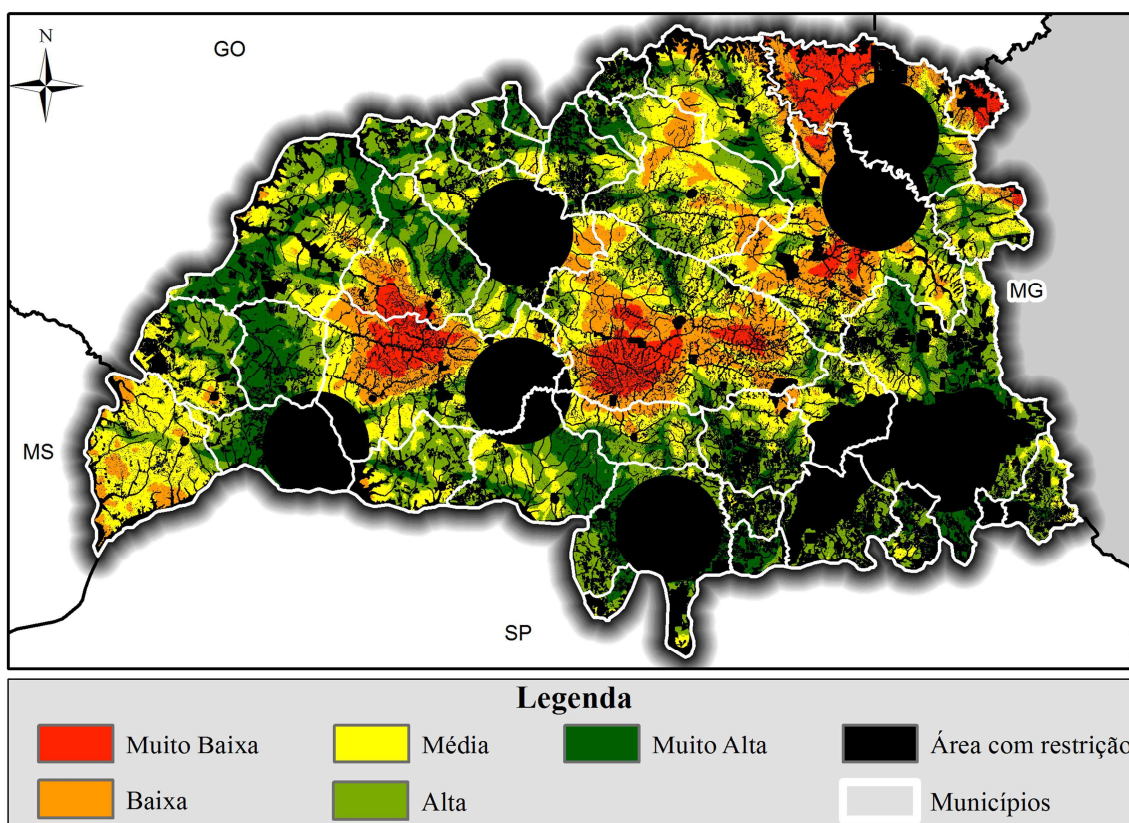


Figura 14 – Classes de aptidão para implantação de usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro, após as etapas de reclassificação e refinamento da superfície de resposta original.

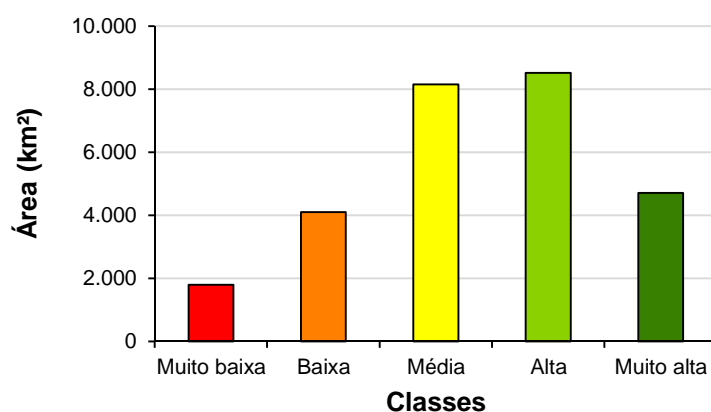


Figura 15 – Área total de cada classe de aptidão, para a região do Triângulo Mineiro.

As classes de aptidão Alta e Muito alta representaram 48,5 % do total de áreas aptas. A classe de aptidão Muito alta encontra-se majoritariamente distribuída ao longo da periferia do Triângulo Mineiro. Há, porém, um certo predomínio dessa classe também na porção oeste do Triângulo Mineiro, como apresentado na Figura 14. Todas

as terras disponíveis no município de Delta enquadram-se na categoria de aptidão Muito Alta. No extremo oposto, o município de Cascalho Rico é o menos atraente para instalação de usinas bioenergéticas. A lista de todos os municípios do Triângulo Mineiro, ordenada de acordo com a média ponderada das classes de aptidão, é apresentada na Figura 16.

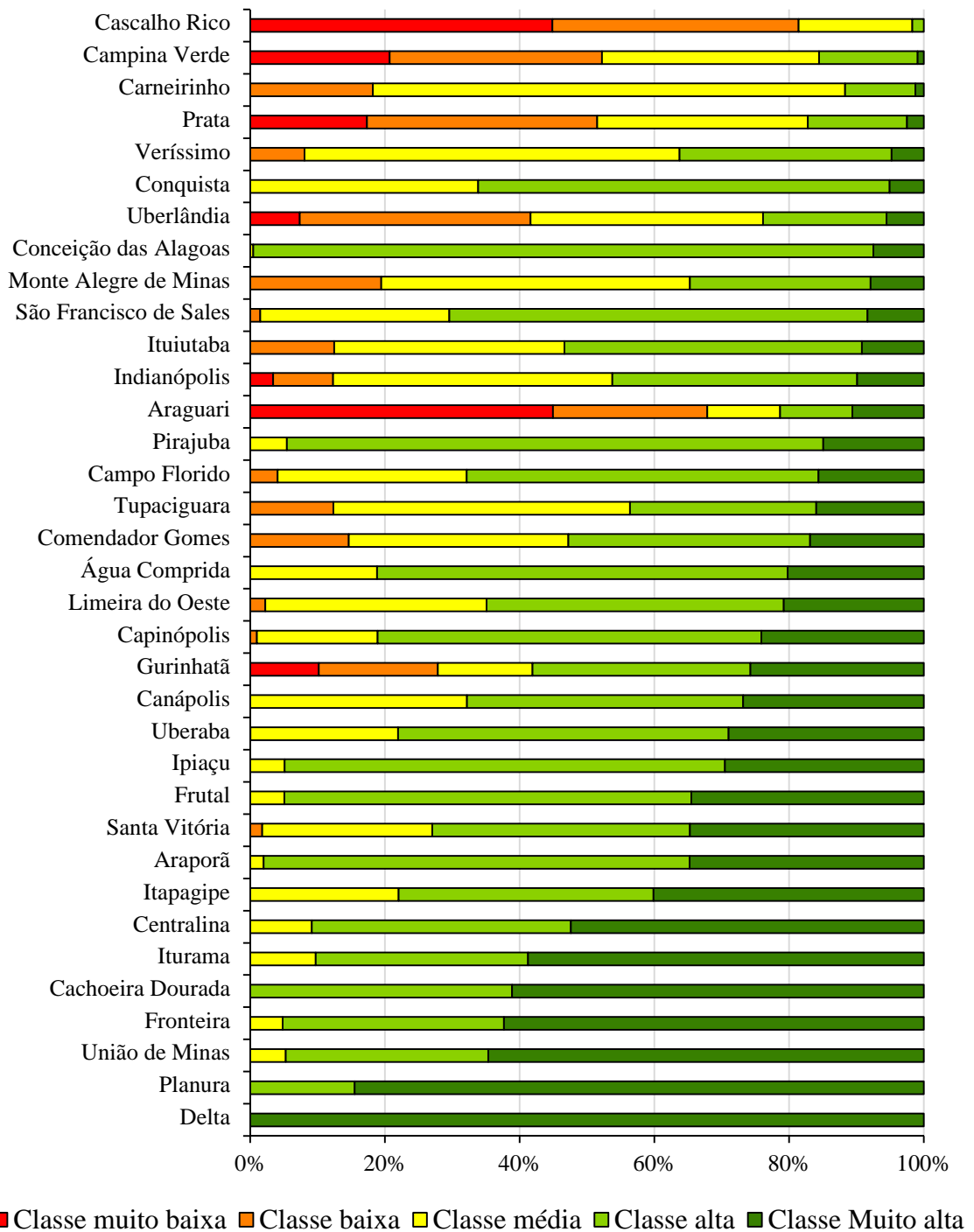


Figura 16 – Municípios do Triângulo Mineiro, em ordem crescente de aptidão para instalação de usinas bioenergéticas.

A região central e a região nordeste do Triângulo Mineiro concentram as piores classes de aptidão para implantação de usinas, como mostra a Figura 14. Essas regiões foram influenciadas, principalmente, pela reduzida oferta de cana-de-açúcar em um raio de 30 km, que é o critério de maior peso (42,47 %) na composição do índice de aptidão (Tabela 6).

A Figura 17 representa os centroides de 1.737 locais potenciais para implantação de usinas bioenergéticas, selecionados pelos seguintes critérios: áreas contínuas superiores a 5 ha e classe de aptidão Muito alta.

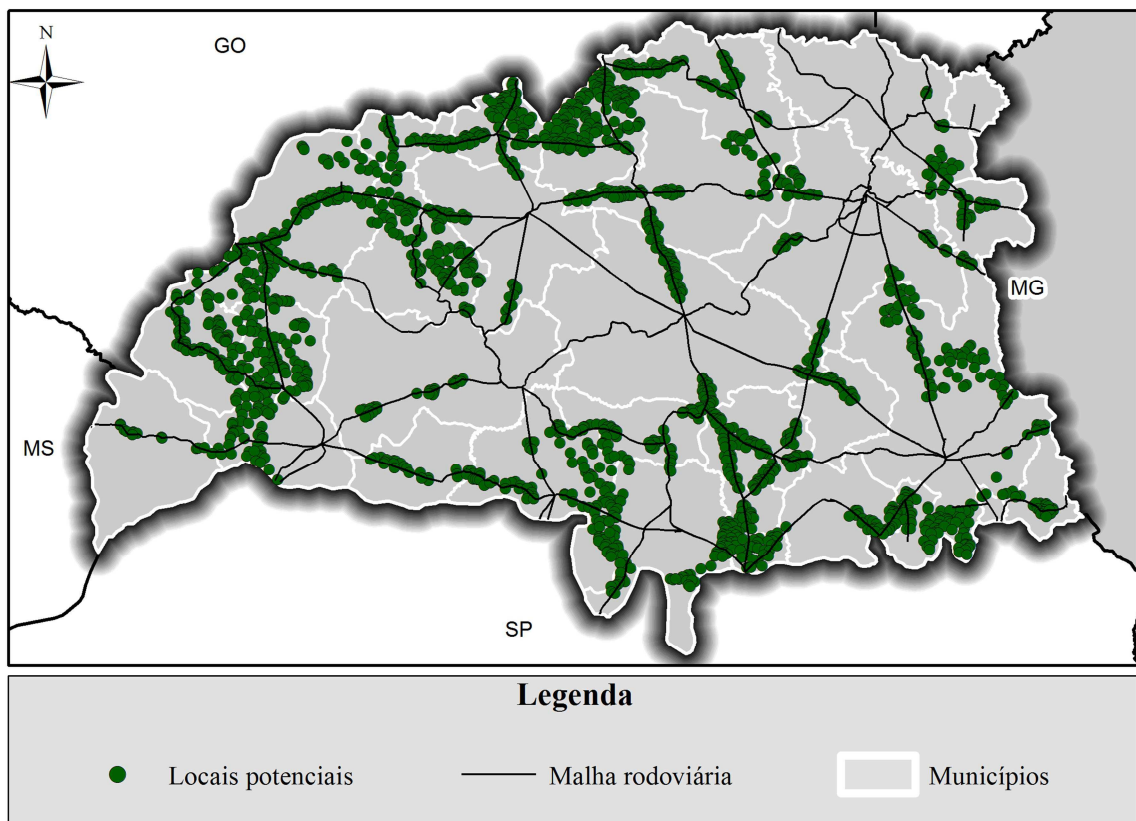


Figura 17 – Centroides dos melhores locais potenciais, com áreas superiores a 5 ha, para implantação de usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro.

Percebe-se, na Figura 17, a concentração de pontos na periferia do Triângulo Mineiro. Essa concentração é causada, principalmente, pela grande quantidade de regiões aptas próximas a lavouras de cana-de-açúcar. Por outro lado, o peso do critério Proximidade às Rodovias (12,05 %) na composição do índice de aptidão (Tabela 6) contribuiu para concentração de locais potenciais ao longo das feições desse tema, originando um padrão linear de distribuição desses centroides (Figura 17).

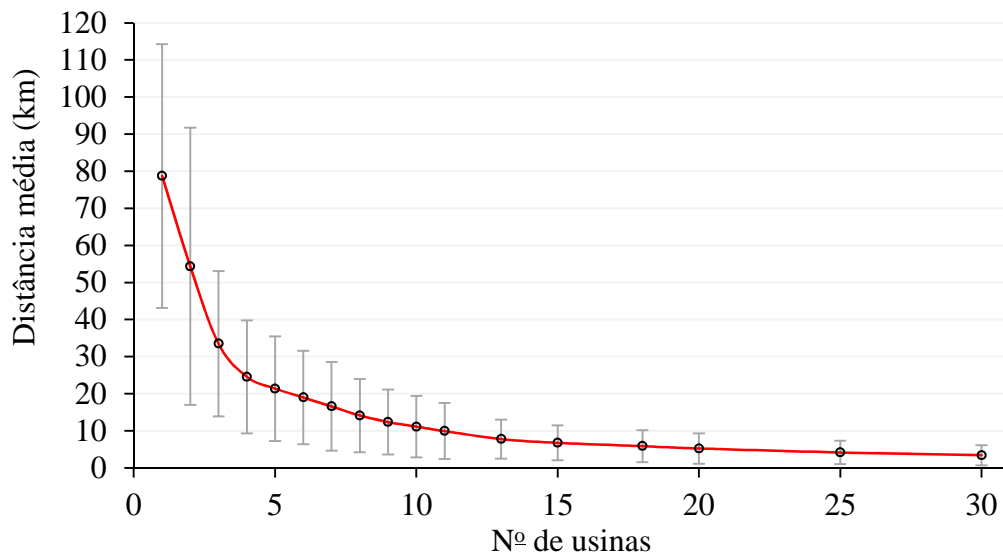
5.3 Melhores locais para implantação de usinas bioenergéticas

O elevado número de pontos de oferta de cana-de-açúcar (12.857) e de locais potenciais para implantação de usinas (1.737) inviabiliza a solução do problema de localização-alocação utilizando-se um método exato, dada a natureza combinatorial do problema (MARTINHAGO, 2013). Assim, o emprego de heurísticas e metaheurísticas é fundamental para resolver esse tipo de problema em um tempo aceitável.

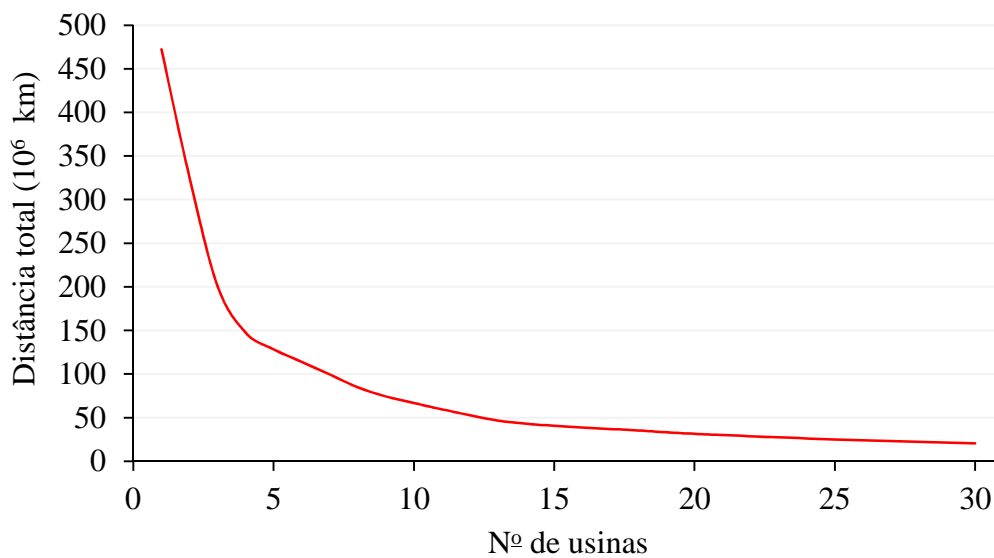
Como ponto de partida, criou-se um cenário em que uma única usina seria capaz de consumir cerca de 50 % de toda a produção disponível de cana-de-açúcar do Triângulo Mineiro, que é da ordem de 50 Mt/ano. Ao implantar uma única usina com capacidade de processamento de 24 Mt/ano de cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro, a solução do problema de localização-alocação resultou em alto deslocamento total ($\sim 470 \times 10^6$ km) e distância média elevada (~ 80 km) para o transporte da matéria-prima à usina (Figura 18). Assim, considerando-se ainda o alto investimento em infraestrutura, a instalação de única usina desse porte é inviável em termos práticos. Segundo dados do setor sucroalcooleiro brasileiro referentes à safra 2010/2011, a maior usina em operação no Brasil tem capacidade efetiva de 8,416 Mt (CONAB, 2013). Além disso, de acordo com Miranda e Cavalli (2013), a situação ideal para abastecer uma usina de cana-de-açúcar é ter os plantios localizados em um raio de até 30 km. A partir desta distância, os deslocamentos passam a ser críticos e a onerar consideravelmente o custo de produção do etanol, e acima de 50 km são considerados antieconômicos.

Executou-se, então, uma série de simulações, variando o número simultâneo de usinas instaladas, até o limite de 30. Para cada execução, a capacidade individual de cada usina era calculada dividindo-se 24 Mt pelo número total de usinas. Assim, na segunda simulação utilizaram-se duas usinas com capacidade de 12 Mt cada uma.

Analisando a Figura 18a e a Figura 18b, percebe-se que à medida em que se aumenta o número de usinas e diminui-se a capacidade, as distâncias média e total diminuem acentuadamente, até a implantação de quatro usinas; entretanto, daí em diante até a implantação de 15 usinas, observa-se uma queda mais lenta. A partir da 15ª usina nota-se comportamento linear decrescente das curvas de distâncias média e total, tendendo para zero. Para quatro usinas, as distâncias média e total reduzem-se para 31 % das distâncias média e total associadas a uma única usina; já para 15 usinas, esse valor representa apenas 9 % daquele valor e para 30 usinas de 0,8 Mt diminui cerca de 4 %. A mesma tendência de comportamento, ou seja, uma curva exponencial negativa,



(a)



(b)

Figura 18 – (a) Distância média e (b) distância total de transporte em função do número de usinas. As barras verticais representam o desvio-padrão.

quando se aumenta o número de usinas, foi observada nos trabalhos de Dong (2008) e Sultana e Kumar (2012).

A seleção de um maior número de usinas de menor capacidade de produção e com menor raio de acesso aos pontos de oferta de matéria-prima contribui para atenuar os impactos ambientais e sociais, comparativamente à magnitude daqueles oriundos da instalação de grandes usinas, com destaque para a redução do tráfego de caminhões pesados dentro do raio de abrangência de cada usina. Deve-se mencionar, ainda, a melhor distribuição da oferta de empregos diretos e indiretos associados à implantação

de um maior número de pequenos empreendimentos, contribuindo para a diversificação e o fortalecimento da economia regional e a consequente melhoria na qualidade de vida de sua população. Esse modelo segue o mesmo padrão observado nos atuais programas de fomento florestal, em que se procura envolver o maior número possível de pequenos produtores rurais, ampliando-se sua abrangência. Contudo, outros fatores, por exemplo, incentivos fiscais dos municípios, podem influenciar significativamente a escolha da localização e do número ideal de usinas.

Na Figura 19 estão as simulações para 1, 4, 10, 15, 20 e 30 usinas e seus respectivos pontos de oferta de cana-de-açúcar (pontos amarelos). As linhas azuis representam a alocação dos pontos de oferta às usinas.

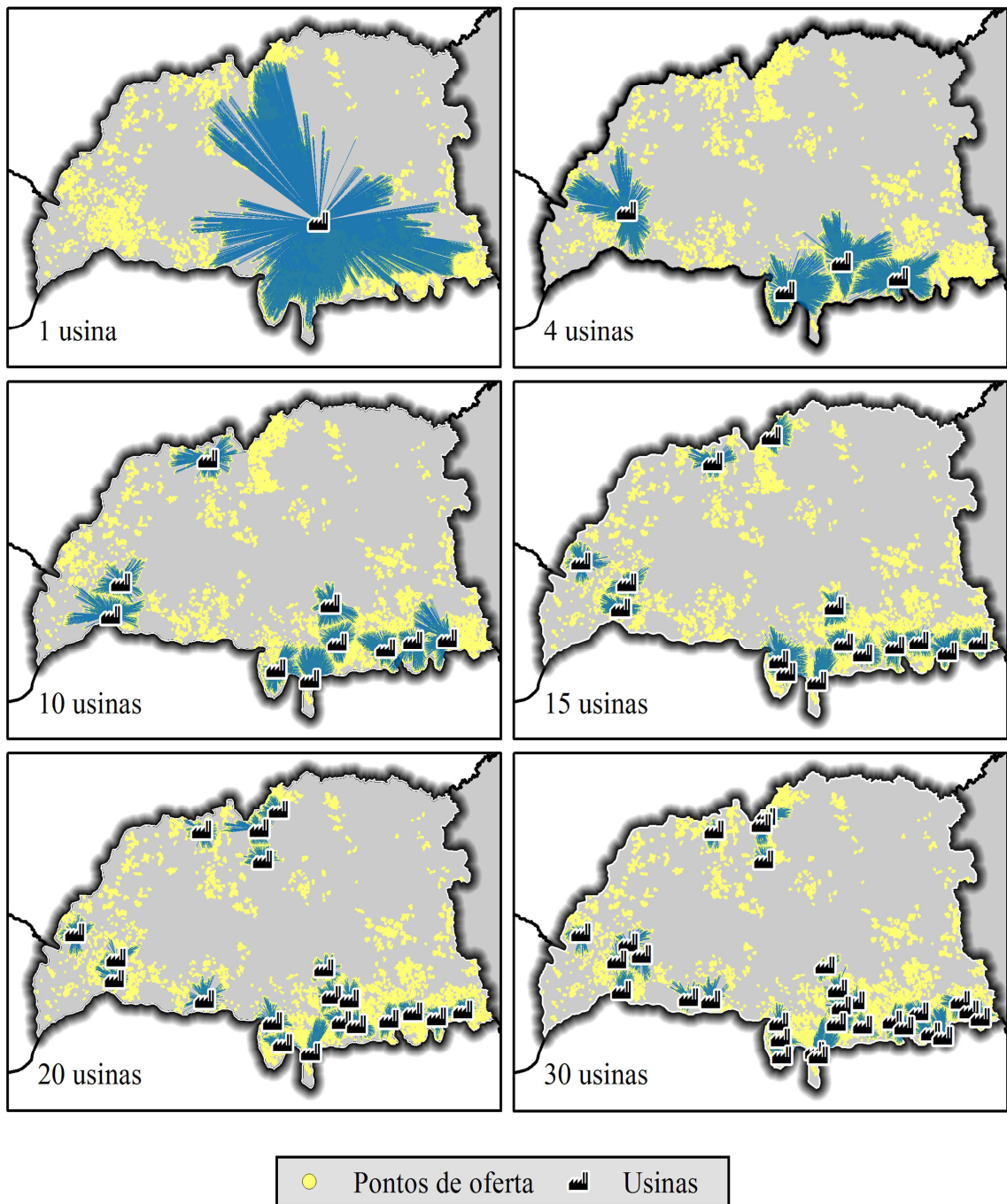


Figura 19 – Representação das localizações ideais das usinas bioenergéticas no Triângulo Mineiro para $p = 1$; $p = 4$; $p = 10$; $p = 15$; $p = 20$; e $p = 30$.

6. CONCLUSÕES

Dada a natureza intrinsecamente espacial do planejamento estratégico de instalação de usinas bioenergéticas, é fundamental o uso dos recursos disponibilizados pelos Sistemas de Informações Geográficas para apoiar o processo de tomada de decisão. A correta formulação do problema de localização-alocação requer bases de dados espaciais detalhadas e atualizadas, em que se destacam a classificação do uso da terra e cobertura vegetal, a distribuição da oferta de matéria-prima, a capacidade e as condições de trafegabilidade da malha viária existente e proposta (ferrovias, rodovias e, eventualmente, hidrovias), as limitações e os impedimentos impostos pela legislação vigente e a disponibilidade de áreas apropriadas para instalação do número ideal de usinas.

A análise multicritério mostrou-se eficaz para o desenvolvimento de um índice de aptidão de terras para identificação de locais apropriados à implantação de usinas bioenergéticas. A espacialização deste índice permitiu estabelecer, de forma objetiva, a atratividade de cada município do Triângulo Mineiro para esse tipo de empreendimento.

Com relação ao modelo de localização-alocação desenvolvido com a utilização da extensão *Network Analyst* do ArcGIS, destacam-se a facilidade de formulação do respectivo problema propiciada pelas suas interfaces gráficas e a possibilidade de explorar uma ampla gama de cenários, quando comparadas à formulação e resolução do mesmo problema pela abordagem clássica, ou seja, via programação linear inteiramista. Considerando os resultados do problema de localização-alocação desenvolvido para a região do Triângulo Mineiro, conclui-se que o aumento no número de usinas de menor capacidade resulta na sua melhor distribuição espacial, uma vez que os diferentes arranjos espaciais para a oferta de matéria-prima aumentam.

A apresentação dos resultados deste estudo sob a forma de mapas temáticos favorece a compreensão do espaço de soluções e estimula uma interpretação mais abrangente do gestor acerca das implicações decorrentes da localização ideal de usinas bioenergéticas, quando comparada a um relatório textual.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. M. **Seleção de famílias de irmãos-completos de cana-de-açúcar e estimativa da diversidade genética via marcador de DNA (ISSR)**. 2010. 71 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, RJ, 2010.

ANDRADE, L. A. de B.; CARDOSO, M. B. **Cultura da cana-de-açúcar**. Lavras, MG: UFLA/FAEPE, 2004.

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. **Base de dados**. Brasília, DF: Aneel, 2013. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 10 out. 2013.

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.

ALMG – ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DE MINAS GERAIS. Municípios de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2013. Disponível em: <http://www.almg.gov.br/consulte/info_sobre_minas/index.html?sltMuni=18>. Acesso em: 9 jul. 2013.

ATEHORTUA, M. R. **Análise comparativa da geomorfologia, solos e uso da terra dos municípios de Puerto López (Colômbia) e Uberlândia (Brasil)**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2004.

BEHAINE, J. J. S. **Análise de fatores condicionantes da decisão de implantação de usinas sucroalcooleiras no estado de Minas Gerais**. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

BEZERRA, S. N. **Algoritmos evolutivos paralelos aplicados ao problema das P-medianas**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.

BRASIL. Leis e decreto, etc. Presidência da República Lei nº 12.651, de 12 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 decreto, etc. Presidência da República. Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010. Regulamenta os arts. 6º, 11 e 12 da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil,

BRASIL. Leis e decreto, etc. Presidência da República. Lei nº 9.985, 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 decreto, etc. Presidência da República. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decreto, 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 decreto, etc. Presidência da República. Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986. Dispõe sobre o Código Brasileiro de Aeronáutica. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil.

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

BRASIL. Leis e decreto, 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 decreto, etc. Presidência da República. Resolução Conama, nº 4, de 9 de outubro de 1995. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil,

BRASIL. Leis e decreto, etc. Presidência da República. Resolução Conama nº 13, de 6 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 decreto, etc. Presidência da República. Resolução Conama nº 428, de 17 de dezembro de 2010. Dispõe, no âmbito do licenciamento ambiental sobre a autorização do órgão responsável pela administração da Unidade de Conservação (UC), de que trata o § 3º do artigo 36 da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, bem como sobre a ciência do órgão responsável pela administração da UC no caso de

licenciamento ambiental de empreendimentos não sujeitos a EIA-RIMA e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil.

BRONDANI, A. E.; FRANÇA, F. A. M.; BOAVENTURA NETTO, P. O.; JURKIEWICZ, S.; KOPP JÚNIO, R. V. Aplicação de um modelo de p-medianas para alocação de unidades urbanas de lazer. In: CONGRESSO LATINO-IBEROAMERICANO DE INVESTIGACION OPERATIVA e SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

CHAGAS, L. A. C. **Reflorestamento políticas de incentivos fiscais no Triângulo Mineiro/AltoParanaíba**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2002.

CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. A. A bioeletricidade sucroenergética na matriz elétrica. In: SOUSA, E. L. L.; MACEDO, I. C. **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo, SP: Luc Projetos de Comunicação, 2010. p. 136-154.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil – safra 2010/2011**. 64 p. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 9 dez. 2013.

CORTEZ, L. A. B.; BALDASSIN JUNIOR, R.; ALMEIDA, E. Energia da cana-de-açúcar. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, MG, 2013. p. 17-58.

COYLE, W. **The future of biofuels: A global perspective**. 2007. Disponível em: <<http://aoatools.aula.gr/pilotec/files/bibliography/Future%20of%20Biofuels-0572659200/Future%20of%20Biofuels.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2007

CURRENT, J.; DASKIN, M.; SCHILLING, D. Discrete network location models. Cap. 3. In: DREZNER, Z.; HAMACHER, H. **Facility location theory: Applications and methods**. (Ed.). Berlin: Springer-Verlang, 2002. p. 81-118.

DASKIN, M. **Network and discrete location: Models, algorithms, and applications**. New York: Wiley Interscience, 1995.

DIAS, A. F. **O problema da p-mediana aplicado ao problema da gestão ótima da diversidade**. 2005. 82 f. Dissertação (Mestrado em Matemática e Aplicações) – Universidade de Aveiro, Portugal. 2005.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Base de dados georreferenciados PNLT 2010**. Brasília, DF: DNIT, 2013. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/3322>>. Acesso em: 15 set. 2012.

DONG, J. **GIS and location theory based bioenergy systems planning**. 2008. 126 p. Master of Applied Science in Systems Design Engineering. University of Waterloo. Ontario, 2008.

DREZNER, Z. **Facility location**: A survey of applications and methods. New York: Springer-Verlag, 1995.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIAS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Serviço de Produção de Informação, IA, 1999. 412 p.

EBC – EMPRESA BRASILEIRA DE COMUNICAÇÃO. **Brasil precisará de 100 novas usinas de etanol até 2020**. 2013. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2013-06-27/brasil-precisara-de-100-novas-usinas-de-etanol-ate-2020>>. Acesso em: 17 dez. 2013.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Help 10.2**. Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//016w0000005s000000>>. Acesso em: 3 mar. 2013.

GALVÃO, R. D. Modelos e algoritmos para problemas de localização em redes. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 3-22, 1981.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and intractability, a guide to the theory of NP-completeness**. 1. ed. New York: Freeman, 1979.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2002.

GOMES, R. M.; CLEPS JUNIOR, J. Transformações no mundo rural e a reforma agrária em Minas Gerais: os movimentos socioterritoriais e a organização camponesa no Triângulo Mineiro. In: FEITOSA, A. M. A.; ZUBA, J. A. G.; CLEPS JUNIOR, J. (Org.). **Debaixo da lona**: tendências e desafios regionais da luta pela terra e da reforma agrária no Brasil. Goiânia, GO: UCG, 2006. p. 131-169.

GUERRA, E. P.; FUCHS, W. **Produção de óleo vegetal**: comestível e biocombustível. Viçosa: CPT, 2009. 226 p.

HAKIMI, S. L. Optimum location of switching centers and the absolute centers and the medians of a graph. **Operations Research**, v. 12, p. 450-459, 1964.

HÖRNER, D. **Resolução do problema das p-medianas não capacitado: comparação de algumas técnicas heurísticas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal – 2012**. 2013. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp>>. Acesso em: 21 jul. 2011.

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAL. **Atlas digital da flora nativa e reflorestamentos de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005. (1 DVD).

JBIC. **Estudo prospectivos para fomento dos biocombustíveis no Brasil**. Relatório final. 2006. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/paper/2006/estudo_biocombustiveis_brasil_13092006.pdf> Acesso em: 27 nov. 2013.

KOIKAI, J. S. **Utilizing GIS-based suitability modeling to assess the physical potential of bioethanol processing plants in Western Kenya**. 2008. Disponível em: <<http://www.gis.smumn.edu/GradProjects/KoikaiJ.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2013.

LEAL, M. R. L. V. Cana energia. In: CORTEZ, L. A. B. (Ed.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para a produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010a. p.751-760.

LEAL, M. R. L. V. Evolução tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. In: CORTEZ, L. A. B. (Ed.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para a produtividade e Sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010b. p. 561-576.

LORENA, L. A. N.; SENNE, E. L. F.; PAIVA, J. A. C.; PEREIRA, M. A. Integração de modelos de localização a sistemas de informações geográficas. **Gestão & Produção**, v. 8, n. 2, p. 180-195, ago. 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v8n2/v8n2a05.pdf>>. Acesso em: 9 mar. 2013.

MAGALHÃES, S. R de. **Análise do comportamento do fogo em diferentes períodos e configurações da paisagem da freguesia de Delião, Portugal**. 2011. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2009. 55 p.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 5 dez. 2013.

MAPA, S. M. S. **Localização-alocação com sistemas de informações geográficas e modelagem matemática**. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.

MAPA, S. M. S.; LIMA, R. S. Uso combinado de sistemas de informações geográficas para transportes e programação linear inteira mista em problemas de localização de instalações. **Revista Gestão & Produção**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 119-136, 2012.

MARANZANA, F. E. On the location of supply points to minimize transport costs. **Operational Research Quarterly**, London, v. 15, n. 3, p. 261-270, 1964.

MARSTEN, R. E. **An algorithm for finding almost all of the medians of a Network**. [S.l.]: Northwestern University, 1972. (Discussion Paper, 23).

MARIN, Fábio Ricardo. **Cana-de-açúcar**. Brasília, DC: Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html>. Acesso em: 6 dez. 2013.

MARTINHAGO, A. Z. **Otimização para a locação de pátios de estocagem para exploração de impacto reduzido na Amazônia brasileira**. 2012. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; ARIZONO, H. Melhoria de cana-de-açúcar. In: BOREM, A. (Ed). **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 1999. p. 205-251.

MENEZES, R.; DIALLO, M.; PIZZOLATO, N. D. Escolas públicas em Guaratiba, Rio de Janeiro: aplicação de modelo de p-mediana capacitado e de máxima cobertura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 43., Ubatuba, SP, 2011. **Anais...** Ubatuba, SP, 2011.

METI – MINISTRY OF ECONOMICS, TRADE AND INDUSTRY OF JAPAN. Distribution of ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER G-DEM). Disponível em: <http://www.meti.go.jp/english/press/data/20090626_03.html>. Acesso em: 7 jun. 2013.

MIRANDA, E. E.; CAVALLI, A. C. O etanol combustível: Solução ou problema nacional? In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Ed.). **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, MG, 2013. p 167-188.

MIRANDA, E. E.; Aspectos ambientais da cana-de-açúcar. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Ed.). **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, MG, 2013. p 189-203.

MME – MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, colaboração Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, DF, 2007.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; CONSOLI, M. O mapa sucroenergético do Brasil. In: SOUSA, E. L. L.; MACEDO, I. C. (Ed.). **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo, SP: Luc Projetos de Comunicação, 2010. p. 14-44.

OLIVEIRA, J. M. S. **Estudo de viabilidade financeira para produção de etanol em pequena propriedade**. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologias Aplicáveis à Bioenergia) – Faculdade de Tecnologia e Ciência. Salvador, BA, 2011.

OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. Strategic facility location: a review. **European Journal of Operational Research**, n. 111, p. 423-447, 1998.

PALHARES, A. C.; VIEIRA, M. L. C. **Estudos genéticos em cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.genetica.esalq.usp.br/pub/seminar/ACPalhares-200901-Resumo.pdf>>. Acesso: 7 dez. 2013.

PASSO, D. P. **Análise da qualidade de classificadores para identificação de alvos urbanos em imagens de alta resolução espacial - uma aplicação com as imagens do satélite WORLDVIEW II**. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/13435>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

PRADO, D. F. M. **Busca tabu aplicada ao problema de localização de facilidades com restrições de capacidades e fonte única**. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

QUEIROZ, S. T. P. **Usinas de álcool – fatores influentes no processo de escolha da localização de novas unidades**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

RAMOS, M. V. V.; CURI, N.; MOTTA, P. E. F.; VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; SILVA, M. L. N. Veredas do Triângulo mineiro: solos, água e uso. **Revista Ciências Agrotécnicas**, Lavras, MG, v. 30, n. 2, p. 283-293, mar./abr. 2006.

RAMOS, R.A.R. **Localização industrial – Um modelo espacial para o Noroeste de Portugal**. 2000. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2000.

REIS, L. N. G.; BRITO, J. L. S. Mapeamento da cana-de-açúcar nas microrregiões do Triângulo Mineiro, MG, utilizando imagens RAPIDEYE. 2010. In: ENCONTRO NACIONAL DE GEOGRAFIA AGRÁRIA, 21, Uberlândia, MG, 2010. **Anais...** Uberlândia, MG, 2010.

ROSETTO, R.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; MELLIS, E. V.; VARGAS, V. P.; CANTARELLA, H.; PRADO, H.; DIAS, F. L. F.; LANDELL, M. G. A.; BRANCALIÃO, S. R.; GARCIA, J. C. Cana-de-açúcar: cultivo com sustentabilidade. International Plant Nutrition Institute (IPNI). **Informações Agronômicas**, n. 142, jun. 2013. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/A892E76E206AB60A83257B9D00671954/\\$FILE/Page1-13-142.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/A892E76E206AB60A83257B9D00671954/$FILE/Page1-13-142.pdf)>. Acesso em: 2 dez. 2013.

ROSING, K. E.; REVELLE, C. S.; SCHILLING, D. A. A gamma heuristic for the p-median problem. **European Journal of Operational Research**, v. 117, p. 522-532, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221798002689>>. Acesso em: 11 nov. 2013.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill/Makron Books, 1991. 367 p.

SACANDIFFIO, M. I. G. Logística para escoamento do etanol. In: CORTEZ, L. A. B. **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para a produtividade e sustentabilidade**. Blucher: São Paulo, 2010. p. 785-799.

SANTOS, R. E. R. **Análise da viabilidade energética e econômica da produção de etanol em microdestilarias**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2011.

SARTORI, M. A. **Fatores determinantes para a expansão do setor sucroalcooleiro em Minas Gerais**. 2010. 87 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

SILVA, E.L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. atual. Florianópolis, SC: UFSC, 2005. 138 p.

SIMON, Jucieli. **Culturas bioenergéticas: produção de biomassa, decomposição e liberação de nitrogênio dos resíduos culturais**. 2009. 51 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

SISEMA – SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Base de dados**. Belo Horizonte, MG, 2013. Disponível em: <<http://geosisemanet.meioambiente.mg.gov.br/>>. Acessado em 07 de agosto de 2013.

SULTANA, A.; KUMAR, A. Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system. **Applied Energy**, v. 94, p. 192-201, 2012.

TEITZ, M. B.; BART, P. Heuristic methods for estimating the generalized vertex median of a weighted graph. **Operations Research**, v. 16, p. 955-961, 1968.

VIANA, A. R.; FERREIRA, J. M.; RIBAS FILHO, S. B.; RIBEIRO FILHO, J. **Cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro – PESAGRO – Rio. Disponível em: <<http://www.pesagro.rj.gov.br/cana.html>>. Acesso em: 9 dez. 2013.

WEA – WORLD ENERGY ASSESSMENT. **Energy and the challenge of sustainability**. United Nations Development Programme, United Nations Development of Economic and Social Affairs and World Energy Council, 2000.

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.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG. **Pesquisa Operacional**, v. 25, n. 2, p. 183-199, 2005.

APÊNDICES

APENDICE A

REFINAMENTO

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# -----
# sauvi.py
# Created on: 2013-10-28 12:03:39.00000
# (generated by ArcGIS/ModelBuilder)
# Usage: sauvi <Geobase__ou_workspace__dos_resultados_> <Grid_a_ser_suavizado_> <NumCel>
<>>>suavizado>
# Description:
# Suaviza as bordas de um grid, eliminando-se também grupos de células com tamanho inferior ao limite
especificado pelo usuário
# -----

# Import arcpy module
import arcpy

# Check out any necessary licenses
arcpy.CheckOutExtension("spatial")

# Set Geoprocessing environments
arcpy.env.scratchWorkspace = "E:\\Nome\\Projeto\\Cana_16out13.gdb"
arcpy.env.snapRaster = "E:\\Nome\\Projeto\\Dissertacao_raster.gdb\\modLinNull_rcl"
arcpy.env.cellSize = "E:\\Nome\\Projeto\\Dissertacao_raster.gdb\\modLinNull_rcl"
arcpy.env.workspace = "E:\\Nome\\Projeto\\Cana_16out13.gdb"

# Script arguments
Geobase__ou_workspace__dos_resultados_ = arcpy.GetParameterAsText(0)
if Geobase__ou_workspace__dos_resultados_ == '#' or not Geobase__ou_workspace__dos_resultados_:
    Geobase__ou_workspace__dos_resultados_ = "E:\\Nome\\Projeto\\Cana_16out13.gdb" # provide a
default value if unspecified

Grid_a_ser_suavizado_ = arcpy.GetParameterAsText(1)
if Grid_a_ser_suavizado_ == '#' or not Grid_a_ser_suavizado_:
    Grid_a_ser_suavizado_ = "E:\\Nome\\Projeto\\Dissertacao_raster.gdb\\modLinNull_rcl" # provide a
default value if unspecified

NumCel = arcpy.GetParameterAsText(2)
if NumCel == '#' or not NumCel:
    NumCel = "50" # provide a default value if unspecified

>>>suavizado = arcpy.GetParameterAsText(3)
if >>>suavizado == '#' or not >>>suavizado:
    >>>suavizado = "%scratchworkspace%\\suavizado" # provide a default value if unspecified

# Local variables:
IsNull = Grid_a_ser_suavizado_
ND_0 = IsNull
ND_grp = ND_0
ND_grp__2_ = ND_grp
NDgrp_ge50 = ND_grp__2_
grp_ge50__2_ = NDgrp_ge50
grp_ge50__3_ = grp_ge50__2_
suav_aux = grp_ge50__3_
grp_ge50__4_ = grp_ge50__3_
grp_ge50_Layer = grp_ge50__4_
```

```

grp_ge50_Layer__3_ = grp_ge50_Layer
grp_ge50_Layer__2_ = grp_ge50_Layer__3_
grp_ge50_Layer__5_ = grp_ge50_Layer__2_
grp_link = grp_ge50_Layer__5_
grp_IsNull = grp_link
link_ND = grp_IsNull
grupos = Grid_a_ser_suavizado_
grupos__2_ = grupos
bnd_cln_grp = grupos__2_
grp_ge50 = bnd_cln_grp
v0 = "0"
-1 = "-1"

# Process: Is Null
arcpy.gp.IsNull_sa(Grid_a_ser_suavizado_, IsNull)

# Process: Set Null
arcpy.gp.SetNull_sa(IsNull, v0, ND_0, "VALUE = 0")

# Process: Region Group (2)
arcpy.gp.RegionGroup_sa(ND_0, ND_grp, "FOUR", "WITHIN", "NO_LINK", "")

# Process: Build Raster Attribute Table (2)
arcpy.BuildRasterAttributeTable_management(ND_grp, "Overwrite")

# Process: Set Null (3)
arcpy.gp.SetNull_sa(ND_grp__2_, v0, NDgrp_ge50, "Count < %NumCel%")

# Process: Region Group
arcpy.gp.RegionGroup_sa(Grid_a_ser_suavizado_, grupos, "FOUR", "WITHIN", "ADD_LINK", "")

# Process: Build Raster Attribute Table
arcpy.BuildRasterAttributeTable_management(grupos, "NONE")

# Process: Boundary Clean
arcpy.gp.BoundaryClean_sa(grupos__2_, bnd_cln_grp, "DESCEND", "ONE_WAY")

# Process: Extract by Attributes (2)
arcpy.gp.ExtractByAttributes_sa(bnd_cln_grp, "COUNT >= %NumCel%", grp_ge50)

# Process: Mosaic
arcpy.Mosaic_management("%scratchworkspace%\\NDgrp_ge50", grp_ge50, "MINIMUM", "FIRST",
"", "", "NONE", "0", "NONE")

# Process: Build Raster Attribute Table (3)
arcpy.BuildRasterAttributeTable_management(grp_ge50__2_, "Overwrite")

# Process: Join Field
arcpy.JoinField_management(grp_ge50__3_, "Value", grupos__2_, "Value", "LINK")

# Process: Make Raster Layer
arcpy.MakeRasterLayer_management(grp_ge50__4_, grp_ge50_Layer, "", "-317783,113219165 -
2765,65567731485 212376,886780835 332424,344322685", "")

# Process: Select Layer By Attribute
arcpy.SelectLayerByAttribute_management(grp_ge50_Layer, "NEW_SELECTION", "Value = 0")

# Process: Calculate Field (2)
arcpy.CalculateField_management(grp_ge50_Layer__3_, "LINK", "!Value!", "PYTHON", "")

```

```
# Process: Select Layer By Attribute (2)
arcpy.SelectLayerByAttribute_management(grp_ge50_Layer__2_, "CLEAR_SELECTION", "")

# Process: Lookup
arcpy.gp.Lookup_sa(grp_ge50_Layer__5_, "LINK", grp_link)

# Process: Is Null (2)
arcpy.gp.IsNull_sa(grp_link, grp_IsNull)

# Process: Con
arcpy.gp.Con_sa(grp_IsNull, -1, link_ND, grp_link, "Value = 1")

# Process: Nibble
arcpy.gp.Nibble_sa(link_ND, grp_ge50__3_, suav_aux, "DATA_ONLY")

# Process: Set Null (2)
arcpy.gp.SetNull_sa(suav_aux, suav_aux, >>>suavizado, "Value = 0")
```

APENDICE B

SELEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE LOCAIS POTENCIAIS

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# -----
# ident.py
# Created on: 2013-10-28 11:59:57.00000
# (generated by ArcGIS/ModelBuilder)
# Usage: ident <LocaisCandidatos_gdb> <suavizado>
# Description:
# -----

# Set the necessary product code
# import arcinfo

# Import arcpy module
import arcpy

# Check out any necessary licenses
arcpy.CheckOutExtension("spatial")

# Set Geoprocessing environments
arcpy.env.scratchWorkspace = "E:\\Nome\\Projeto\\LocaisCandidatos.gdb"
arcpy.env.snapRaster = "E:\\Nome\\Projeto\\Cana_16out13.gdb\\suavizado"
arcpy.env.extent = "E:\\Nome\\Projeto\\Cana_16out13.gdb\\suavizado"
arcpy.env.cellSize = "%scratchworkspace%\\candidatos"
arcpy.env.mask = ""
arcpy.env.workspace = "E:\\Nome\\Projeto\\LocaisCandidatos.gdb"

# Script arguments
LocaisCandidatos_gdb = arcpy.GetParameterAsText(0)
if LocaisCandidatos_gdb == '#' or not LocaisCandidatos_gdb:
    LocaisCandidatos_gdb = "E:\\Nome\\Projeto\\LocaisCandidatos.gdb" # provide a default value if
    unspecified

suavizado = arcpy.GetParameterAsText(1)
if suavizado == '#' or not suavizado:
    suavizado = "E:\\Nome\\Projeto\\Cana_16out13.gdb\\suavizado" # provide a default value if
    unspecified

# Local variables:
grp = LocaisCandidatos_gdb
grp__2_ = grp
candidatos = grp__2_
cand_pol = candidatos
cand_pol__2_ = cand_pol
cand_pol__3_ = cand_pol__2_
cand_pol__4_ = cand_pol__3_
centroides = cand_pol__4_

# Process: Region Group
arcpy.gp.RegionGroup_sa(suavizado, grp, "FOUR", "WITHIN", "ADD_LINK", "")

# Process: Build Raster Attribute Table
arcpy.BuildRasterAttributeTable_management(grp, "NONE")
```

```
# Process: Extract by Attributes
arcpy.gp.ExtractByAttributes_sa(grp__2_, "( LINK = 5 ) AND ( Count > 55 )", candidatos)

# Process: Raster to Polygon
arcpy.RasterToPolygon_conversion(candidatos, cand_pol, "NO_SIMPLIFY", "LINK")

# Process: Delete Field
arcpy.DeleteField_management(cand_pol, "area_ha")

# Process: Add Field
arcpy.AddField_management(cand_pol__2_, "area_ha", "LONG", "", "", "", "", "NULLABLE",
"NON_REQUIRED", "")

# Process: Calculate Field
arcpy.CalculateField_management(cand_pol__3_, "area_ha", "!Shape_Area! / 10000.0", "PYTHON", "")

# Process: Feature To Point
arcpy.FeatureToPoint_management(cand_pol__4_, centroides, "INSIDE")
```