

GUSTAVO EDUARDO MARCATTI

**CAMINHAMENTO ÓTIMO PARA ACESSO ÀS PARCELAS
DE INVENTÁRIO FLORESTAL**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2013

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

T

M313c
2013

Marcatti, Gustavo Eduardo, 1985-
Caminhamento ótimo para acesso às parcelas de inventário
florestal / Gustavo Eduardo Marcatti. – Viçosa, MG, 2013.
v, 32f : il. (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 29-32.

1. Florestas - Administração. 2. Otimização combinatória.
3. Sistemas de informação geográfica. 4. Levantamentos
florestais. 5. Software - Desenvolvimento. 6. Python
(Linguagem de programação de computador). 7. Linguagem
de programação (Computadores). I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.95246

GUSTAVO EDUARDO MARCATTI

**CAMINHAMENTO ÓTIMO PARA ACESSO ÀS PARCELAS
DE INVENTÁRIO FLORESTAL**

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: 28 de fevereiro de 2013.



Marcus Vinícius Alvim Andrade



Vicente Paulo Soares



Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal pelo conhecimento técnico e científico a mim transmitidos, imprescindíveis para realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo financiamento neste período.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal, em especial aos secretários da pós-graduação Ritinha e Alexandre, pelo auxílio constante, ao porteiro Chiquinho, pelo apoio desde o início da graduação.

Aos professores Marcus Vinícius Alvim Andrade e Vicente Paulo Soares, pelas valiosas sugestões e correções feitas durante a defesa deste trabalho.

Aos companheiros e amigos Layon e Macaúba por vários momentos de alegria proporcionados, ao amigo Amaury pela amizade, e por ser um dos meus principais incentivadores.

Aos colegas e amigos do curso de pós-graduação, em especial a Livia e Carlinhos pela amizade e ensinamentos frequentes.

Aos amigos do Laboratório SIGMA, em especial ao Fabrício e ao Nero pela grande amizade desde o princípio da graduação e pela grande contribuição na realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas de graduação do curso de Engenharia Florestal.

Ao Professor Helio Garcia Leite, pela amizade, por toda orientação durante a graduação, coorientação durante o mestrado, pela confiança, pelos desafios e principalmente por ser esse grande mestre, sendo o principal responsável pela minha escolha em especializar na área de manejo florestal.

Ao Professor Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro, pela amizade, pelo apoio e ajuda em momentos críticos, demonstrando um empenho apenas praticado em prol de um filho, por sua criatividade e inteligência, contribuindo e muito para o desenvolvimento deste trabalho, inclusive com a inspiração inicial, pelo seu exemplo de conduta e inquietude diante de um desafio, enfrentando-o até resolvê-lo, e

principalmente pelo incentivo em trabalhar com sistemas de informação geográfica, sendo hoje a minha principal linha de pesquisa.

Ao meu pai Theodoberto, por ser meu principal mestre e incentivador, ser um exemplo de conduta e superação. A minha mãe Ana Maria pelo carinho, por priorizar as necessidades dos filhos acima de suas próprias. Obrigado aos dois pelo apoio e amizade incondicional, por sempre estarem ao meu lado nos momentos alegres ou tristes. Aos meus irmãos, pela amizade e apoio, por contribuir tanto com minha formação, principalmente a inicial.

A minha esposa Francine por ser essa pessoa maravilhosa, um exemplo a ser seguido, conquistando a admiração de todos a sua volta, por toda essa força de vontade e garra que me contagia e incentiva a conquistar coisas melhores, por ser um exemplo de mãe e esposa, sempre muito dedicada, amorosa, pelo apoio e ajuda em todos os momentos de nossa caminhada, principalmente na realização deste trabalho. Obrigado por ser essa fonte de amor e companheirismo.

Ao meu filho Eduardo que mesmo tão novo já é um exemplo de superação e força de vontade, com ele me sinto capaz de superar qualquer obstáculo, considero-o como principal colaborador para o desenvolvimento desse trabalho.

A todos, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

GUSTAVO EDUARDO MARCATTI, filho de Ana Maria Leite Marcatti e Theodoberto Marcatti, nasceu em Virginópolis, estado de Minas Gerais, em 19 de julho de 1985.

Em março de 2001, ingressou na Central de Desenvolvimento Agrário de Florestal – CEDAF/UFV, onde obteve o título de Técnico em Agropecuária concomitantemente com o ensino médio, em dezembro de 2003.

Em março de 2007, iniciou o curso de Graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, obtendo o título de Engenheiro Florestal em 22 de julho de 2011.

Em agosto de 2011, iniciou o Mestrado em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa, concentrando seus estudos na área de Manejo Florestal, Otimização e Sistema de Informações Geográficas. Defendeu a dissertação em fevereiro de 2013.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	5
3 MATERIAIS E MÉTODOS	6
3.1 Área de Estudo	6
3.2 Softwares utilizados.....	7
3.3 Otimização do acesso às parcelas.....	7
3.4 Custo de Caminhamento	8
3.4.1 Custo baseado na distância euclidiana.....	8
3.4.2 Custo com a imposição das estradas.....	9
3.5 Otimização do caminhamento.....	10
3.5.1 Formulação via problema do caixeiro-viajante.....	10
3.5.2 Formulação via vizinho mais próximo	12
3.6 Interface gráfica para usuário e integração com um Sistema de Informações Geográficas.....	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	16
4.1 Otimização do acesso às parcelas.....	16
4.2 Otimização do caminhamento.....	18
4.3 Interface gráfica para usuário e integração com um Sistema de Informações Geográficas.....	23
5 CONCLUSÕES.....	28
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

RESUMO

MARCATTI, Gustavo Eduardo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2013. **Caminhamento Ótimo Para Acesso às Parcelas de Inventário Florestal**. Orientador: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Coorientador: Helio Garcia Leite.

O objetivo desse estudo foi desenvolver metodologias para otimização do acesso e do caminhamento às parcelas de inventário florestal, bem como implementá-las em um ambiente com interface gráfica para o usuário e integradas a um sistema de informações geográficas. Foram utilizados dados provenientes da empresa florestal Floresteca, de plantios de teca (*Tectona grandis*) situados no município de Rosário Oeste, Mato Grosso. A base de dados espaciais foi composta da localização de 80 parcelas de inventário distribuídas em 15 talhões e da rede de estradas florestais existentes no local. Normalmente as empresas florestais brasileiras adotam variações ou combinações de duas estratégias de acesso às parcelas: (1ª) caminhamento da estrada até a parcela e posteriormente da parcela até a estrada, e (2ª) caminhamento da estrada até a parcela e da parcela até uma série de outras parcelas, retornando-se, posteriormente, à estrada. Neste estudo adotou-se a 1ª estratégia. A otimização do acesso foi baseada no algoritmo do vizinho mais próximo. Este algoritmo, basicamente, determina os pontos da estrada mais próximos a cada parcela. Esses pontos são, então, considerados como a entrada da parcela. O problema do caminhamento entre as parcelas foi formulado como um problema do caixeiro-viajante (PCV) permitindo-se, contudo, a imposição da malha viária no processo de otimização. O PCV foi resolvido via formulação de programação linear inteira, sendo otimizado pelo algoritmo *cutting-plane*, disponível no *software* Concorde. Para fins de comparação, o problema foi também resolvido pelo método aproximativo do vizinho mais próximo, uma vez que o executor do inventário aplica esse algoritmo intuitivamente em campo. As metodologias foram implementadas usando-se a linguagem de programação Python e integradas ao *software* ArcGIS. A metodologia de acesso às parcelas otimiza o caminhamento entre a estrada e as parcelas de inventário florestal, e sua implementação computacional permite que a tarefa seja feita de forma automatizada. Com isso, obtêm-se aumento de eficiência tanto no planejamento do inventário quanto em sua execução. A metodologia de caminhamento otimiza o percurso entre as parcelas a serem inventariadas. A solução exata mostrou-se superior à solução aproximada, algo em torno de 17% em média.

ABSTRACT

MARCATTI, Gustavo Eduardo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2013. **Pathway Optimization for Access to Forest Inventory Plots**. Adviser: Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro. Co-adviser: Helio Garcia Leite.

The aim of this study was to develop methods for optimizing access and pathway to forest inventory plots, and to implement them in an environment with graphical user interface and integrated into a geographic information system. We used data from a plantation of teak (*Tectona grandis*) owned by the forestry company Floresteca, located in the city of Rosário Oeste, Mato Grosso. The spatial database was composed of localization of 80 inventory plots distributed in 15 stands, as the network of forest roads located on site. Usually, the Brazilian forestry companies adopt variations or combinations of two strategies to access the portions: (1st) moving from the road to the parcel and then, from parcel to the road, and (2nd) moving from the road to the plot, then from the plot to a series of other plots, to finally return to the road. In this study we adopted the 1st strategy. The optimization of access was based on the nearest neighbor algorithm. This algorithm basically determines the points of the road closest to each plot. These points are then considered as the parcel entrance. The problem of the pathway between plots was formulated as a traveling salesman problem (TSP) allowing, however, the imposition of the road network in the optimization process. The TSP was solved via integer linear programming formulation, followed by an optimization from the algorithm “cutting-plane” available on Concorde software. For comparison purposes, the problem has also been solved by the method of approximate nearest neighbor, since the inventory executor intuitively applies this algorithm in the field. These methods were implemented using the Python programming language and integrated into the ArcGIS software. The parcel access methodology optimizes the path among the roads and the forest inventory plots, and its computational implementation allows the task to be done in an automated fashion. Thus, we obtain increased efficiency both in inventory planning and in execution. The methodology optimizes the traversal path between plots to be inventoried. The exact solution was superior to the approximate solution, something around 17% on average.

1 INTRODUÇÃO

Processos de tomada de decisão no âmbito do planejamento florestal envolvem um amplo conjunto de fatores de naturezas distintas. Face à multiplicidade de objetivos e à complexidade e volume de dados a serem analisados, torna-se imprescindível a utilização de recursos computacionais avançados. Países como Estados Unidos e Canadá possuem uma longa tradição no desenvolvimento e uso de sistemas de apoio ao planejamento florestal. Dentre vários sistemas atualmente em uso, tanto no Serviço Florestal quanto em empresas privadas norte-americanas, destacam-se o SNAP for ArcGIS (Chung *et al.*, 2012) e o Woodstock & Stanley (Remsoft Inc., 2012). Como principais características, citam-se a utilização de técnicas de otimização e a habilidade de se modelarem restrições de natureza espacial no manejo de ecossistemas complexos, em um ambiente de sistemas de informações geográficas.

A globalização das economias acirrou o nível de competição no setor florestal, com a conseqüente redução das margens de lucro, forçando as empresas deste segmento a reverem suas estratégias de produção e nichos de mercado. A indústria brasileira vive um momento de intensa reestruturação, apontando para a consolidação de poucos e grandes grupos, incluindo-se aí parcerias com empresas estrangeiras. A sobrevivência das empresas brasileiras deste setor estratégico passa, necessariamente, pelo aumento da sua competitividade.

No passado, os programas de melhoramento genético e de clonagem propiciaram um aumento considerável na produtividade das nossas florestas comerciais, com destaque para os plantios de eucalipto. Para garantir a rentabilidade e se manterem no mercado, as empresas devem agora investir em iniciativas que melhorem a eficiência das atividades florestais. Apesar de não ser a atividade mais onerosa em termos de custos de produção, o inventário florestal tem papel considerável no processo produtivo, visto a grande quantidade de inventários que são realizados ao longo do tempo por uma empresa florestal. Sendo assim, melhorias nessa atividade resultam em significativas reduções de custos.

As pesquisas em relação a reduções de custos de inventários florestais tradicionais visam, prioritariamente, à diminuição do número de parcelas a serem inventariadas sem que se aumente a incerteza de forma excessiva (Mello, 2004; Nothdurft *et al.*, 2009; Assis *et al.*, 2009). Assis *et al.* (2009) fundamentam-se na

possibilidade de existir dependência espacial entre as unidades amostrais; assim, estratégias de geoestatística podem ser utilizadas no estabelecimento de estratos e na localização de parcelas de inventário. Com isso espera-se reduzir o número de parcelas para um mesmo erro amostral.

Uma abordagem complementar para se reduzirem custos é a otimização do acesso e do caminhamento de parcelas de inventário. Essa alternativa, porém, ainda é pouco explorada no setor florestal. No inventário florestal, as parcelas devem ser visitadas em uma ordem predefinida, para serem então mensuradas. Encontrar a rota que minimiza o custo de caminhamento traz benefícios óbvios ao rendimento do inventário, destacando-se a redução dos custos. Esse cenário típico ilustra o clássico problema do caixeiro-viajante (PCV) ou TSP (*traveling-salesman problem*), cuja definição é a seguinte: dada uma lista de cidades e as distâncias entre elas, o objetivo é encontrar o menor caminho possível para visitá-las, apenas uma vez e, ao final, retornar à cidade de origem (Applegate *et al.*, 2006).

Aparentemente de simples definição, o problema do caixeiro-viajante, entretanto, pertence à classe dos problemas NP-Completo. Isso quer dizer que ainda não existe algoritmo capaz de resolver o problema em tempo razoável, ou seja, em tempo polinomial, i.e., o tempo para resolução cresce em função polinomial em relação ao número de cidades. De acordo com Cormen *et al.* (2009), a maioria dos pesquisadores da ciência da computação acredita que tal algoritmo não exista realmente; porém, ainda não se têm provas definitivas disso.

Uma maneira intuitiva de se encontrar a solução ótima exata de um PCV é utilizar um algoritmo de força bruta (*brute-force*), enumerando-se todas as rotas possíveis e selecionando-se a de menor custo. Porém, esta estratégia torna-se impraticável mesmo para um número bem reduzido de cidades, pois o número de alternativas de rotas aumenta fatorialmente em relação ao número de cidades $(n - 1)!/2$, em que n é o número de cidades (Cook, 2012). Felizmente existem outros algoritmos para se resolver o PCV como, por exemplo, o método *branch-and-bound*, a programação dinâmica, o *branch-and-cut* e o *cutting-plane* (Applegate *et al.*, 2006). Apesar de serem bem mais eficientes, tais métodos apresentam função de complexidade exponencial. Assim, o tempo de resolução aumenta exponencialmente em relação ao número de cidades, o que torna o problema intratável para instâncias de grande porte.

Dentre os algoritmos de solução exata, o *cutting-plane* é um dos mais populares (Applegate *et al.*, 2006). Desenvolvido por Dantzig *et al.* (1954) especificamente para

resolver o PCV, o método foi utilizado para resolver uma instância de 49 cidades, uma quantidade absurdamente grande para aquela época. O *software* Concorde (Applegate *et al.*, 2004) possui o *cutting-plane* implementado e é considerado como um dos mais robustos para se resolver PCV (Davendra, 2010). O Concorde também possui as melhores soluções para o conjunto de problemas da biblioteca TSPLIB (Reinelt, 1995), inclusive para a de maior instância, que é de 85.900 cidades (Applegate *et al.*, 2009). Essa biblioteca contém numerosos problemas para teste do PCV e é disponibilizada eletronicamente pela Universidade de Heidelberg, Alemanha.

Soluções heurísticas também são frequentemente utilizadas para se resolver PCV, principalmente em instâncias muito grandes, em que não é possível obter a solução exata em um tempo razoável. Dentre as heurísticas mais eficientes para esta classe de problemas de otimização destacam-se a Lin-Kernighan (Lin & Kernighan, 1973) e suas variantes (Helsgaun, 2009), o *simulated annealing* (Kirkpatrick *et al.*, 1983), os algoritmos genéticos (Goldberg, 1989; Sivanandam & Deepa, 2008), o algoritmo colônia de formigas (Dorigo *et al.*, 1996; Dorigo & Gambardella, 1997; Dorigo & Stützle, 2004) e as redes neurais (Durbin & Willshaw, 1987).

A execução de um algoritmo para se resolver PCV tem como parâmetro de entrada principal a lista de custos entre as cidades. Geralmente o custo (ou impedância) é baseado em distância ou tempo de percurso. A distância euclidiana é rotineiramente a métrica mais utilizada para o cálculo das distâncias. Porém, na maioria das situações práticas é importante considerar-se a malha viária no processo de otimização, ou seja, impor o caminhamento restringindo-o às estradas existentes. Pode-se adotar um algoritmo de caminho mínimo (*shortest path*), como o algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959), para se obter a lista de distâncias associadas aos trechos da malha viária. A execução do algoritmo para o PCV é exatamente o mesmo, exigindo apenas uma etapa adicional preliminar, que é a aplicação de um algoritmo de caminho mínimo, e também requer um parâmetro de entrada adicional, que é a malha viária.

O acesso às parcelas, ou seja, o caminhamento da estrada à parcela, também deverá ser otimizado. Normalmente as empresas florestais brasileiras adotam variações ou combinações de duas estratégias:

1ª) caminhamento da estrada até a parcela e posteriormente da parcela até a estrada (estrada → parcela_i → estrada).

2ª) caminhamento da estrada até a parcela e da parcela até uma série de outras parcelas, retornando-se, posteriormente, à estrada (estrada \rightarrow parcela₁ \rightarrow parcela₂ ... \rightarrow parcela_n \rightarrow estrada).

A definição de qual estratégia é mais adequada é uma questão relativa, pois dependerá principalmente da intensidade amostral do inventário. Em inventários de baixa intensidade amostral a primeira estratégia é mais adequada; porém não se têm estudos estabelecendo qual seria o limiar de intensidade amostral em que uma estratégia passaria a ser mais interessante que a outra. O ideal é formular o problema englobando as duas estratégias, mais a combinação delas e deixar a cargo do otimizador encontrar a melhor opção (a 1ª estratégia, a 2ª estratégia ou uma combinação das duas).

No presente trabalho desenvolveu-se uma metodologia para otimizar o acesso às parcelas de inventário florestal, baseando-se na 1ª estratégia. Essa estratégia foi escolhida por ser amplamente utilizada, principalmente em inventários florestais contínuos e também pelo fato de que a implementação das demais estratégias seria apenas uma questão de adaptação dessa metodologia. Também foi desenvolvida uma metodologia para otimizar o caminhamento entre as parcelas. O problema foi formulado como um problema do caixeiro-viajante permitindo-se, contudo, a imposição da malha viária no processo de otimização. Ambas as metodologias foram implementadas em um ambiente com interface gráfica para o usuário e integradas a um sistema de informações geográficas (SIG).

2 OBJETIVOS

- Desenvolver metodologias para otimização do acesso e do caminhamento às parcelas de inventário florestal.
- Implementar as metodologias em um ambiente com interface gráfica para o usuário e integradas a um sistema de informações geográficas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

Foram utilizados dados de povoamentos de Teca (*Tectona grandis*) provenientes da empresa florestal Floresteca, situados no município de Rosário Oeste, Mato Grosso. A base de dados espaciais é composta da localização de 80 parcelas de inventário distribuídas em 15 talhões e da rede de estradas florestais existentes no local (Figura 1).

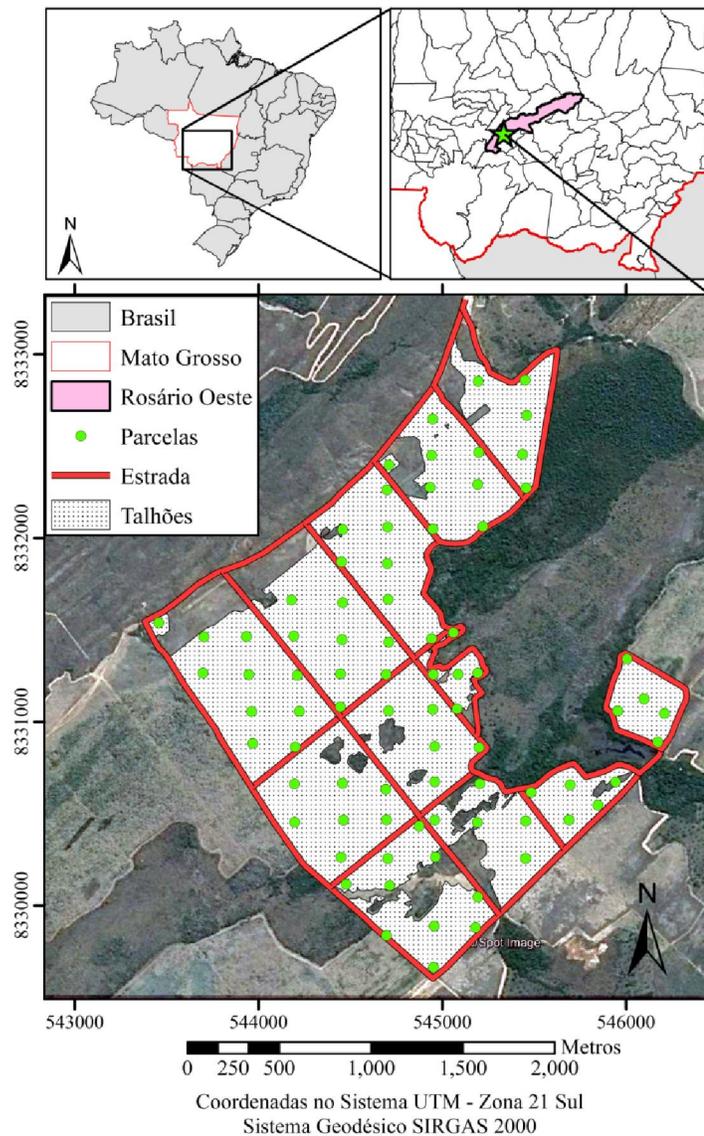


Figura 1. Área de estudo e localização das parcelas, talhões e estradas florestais.

Como fonte de variação para se testarem as metodologias, formularam-se os seguintes cenários: seleção aleatória de 20, 40 e 60 parcelas das 80 totais; geração de 3 repetições aleatórias de 20, 40, 60 e 80 parcelas. Ao final foram gerados 16 cenários (Tabela 1).

Tabela 1. Cenários simulados.

	Cenários			
Localização Original	20	40	60	80
Repetição Aleatória 1	20	40	60	80
Repetição Aleatória 2	20	40	60	80
Repetição Aleatória 3	20	40	60	80

3.2 Softwares utilizados

- Linguagem de programação Python (www.python.org);
- Biblioteca *NetworkX* (Hagberg, 2008);
- Solver Concorde (Applegate *et al.*, 2004);
- ArcGIS versão 10.1 (ESRI, 2013).

3.3 Otimização do acesso às parcelas

Normalmente as empresas florestais brasileiras adotam variações ou combinações de duas estratégias:

1^a) caminhamento da estrada até a parcela e, posteriormente, da parcela até a estrada (estrada → parcela₁ → estrada).

2^a) caminhamento da estrada até a parcela e da parcela até uma série de outras parcelas, retornando-se, posteriormente, à estrada (estrada → parcela₁ → parcela₂ ... → parcela_n → estrada).

No presente estudo a 1^a estratégia foi adotada para acessar as parcelas. Fica claro que o executor do inventário florestal retornará pelo mesmo caminho que ingressou na parcela. O objetivo principal da metodologia é identificar o ponto de entrada da parcela de forma a minimizar o caminhamento dentro do talhão (Figura 2).

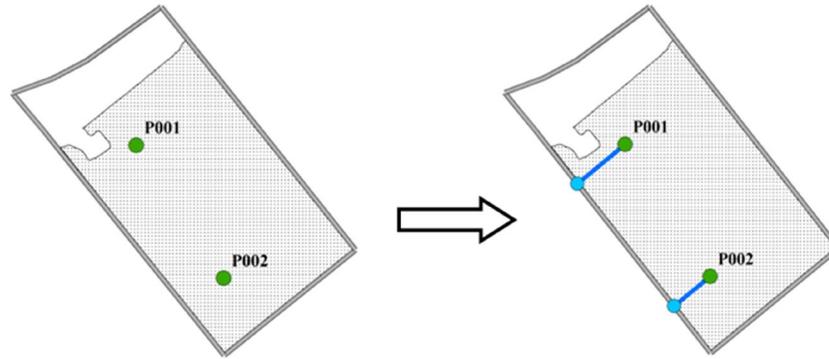


Figura 2. Identificação da entrada e do caminho até a parcela.

A otimização do acesso foi baseada no algoritmo do vizinho mais próximo (*Near_analysis*), presente na biblioteca desenvolvida na linguagem de programação Python (*arcpy*) do *software* ArcGIS. Este algoritmo, basicamente, determina o ponto mais próximo de uma feição com relação ao ponto de consulta (Sedgewick, 1998). O próximo passo foi gerar uma feição espacial do tipo pontos representando os vizinhos mais próximos de cada parcela (entrada da parcela).

3.4 Custo de Caminhamento

3.4.1 Custo baseado na distância euclidiana

A distância euclidiana é a forma de cálculo de custo de caminhamento mais comumente utilizada em estudos do problema do caixeiro-viajante, principalmente em pesquisas que objetivam desenvolver algoritmos e estratégias de resolução do problema. Isso ocorre principalmente pela facilidade de obtenção deste parâmetro. Sejam os pontos A e B e suas respectivas coordenadas (x_a, y_a) e (x_b, y_b) . Para se calcular a distância euclidiana (d_{AB}) basta utilizar a seguinte equação:

$$d_{AB} = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}$$

Outras métricas também podem ser adotadas, como a distância de Manhattan ($|x_a - x_b| + |y_a - y_b|$), por exemplo. Neste caso, a distância entre dois pontos é dada pela soma das diferenças absolutas de suas coordenadas (Martin, 1982). Geometricamente, a distância de Manhattan representa a soma dos catetos de um triângulo; por outro lado, a distância euclidiana é representada pela sua hipotenusa (Figura 3). Um exemplo de aplicação dessa distância seria a otimização do caminhamento de uma máquina de solda que não pode executar movimentos diagonais.

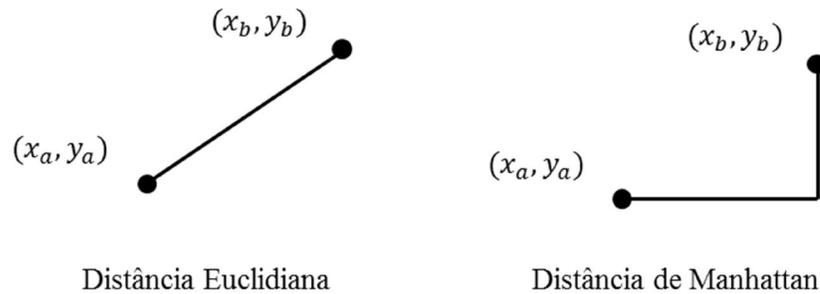


Figura 3. Representação das distâncias euclidiana e de Manhattan.

3.4.2 Custo com a imposição das estradas

Apesar de serem amplamente citadas na literatura, as métricas descritas no tópico anterior não podem ser adotadas em muitas aplicações práticas do PCV. Isso ocorre principalmente em situações em que se tem interesse em otimizar uma rota e obrigatoriamente o caminho resultante deve estar restrito a uma malha viária, ou seja, a malha viária deve ser imposta no processo de otimização. Para se resolver essa questão pode-se aplicar, preliminarmente, um algoritmo de caminho mínimo (*shortest path*) para o cálculo dos custos entre os pares de cidades e depois executar o algoritmo para resolução do problema do caixeiro-viajante (Rodríguez & Ruiz, 2012; ESRI, 2013). Essa etapa é necessária porque, quando se considera a malha viária, surgem inúmeras alternativas de acesso de uma cidade_{*i*} para outra cidade_{*j*} (Figura 4b), diferentemente de quando se adota uma métrica, como a distância euclidiana, em que, para se acessar uma cidade_{*j*} de uma cidade_{*i*} existe apenas uma alternativa (Figura 4a), ou seja, aquela gerada pelo cálculo da métrica. O algoritmo de caminho mínimo irá gerar uma lista com o custo mínimo de acesso para todos os pares de cidades. Para o exemplo da Figura 4b, o custo de se viajar da cidade_{*i*} para a cidade_{*j*} será o associado ao comprimento (tempo, custo, etc) total da linha sólida, que representa o menor caminho.

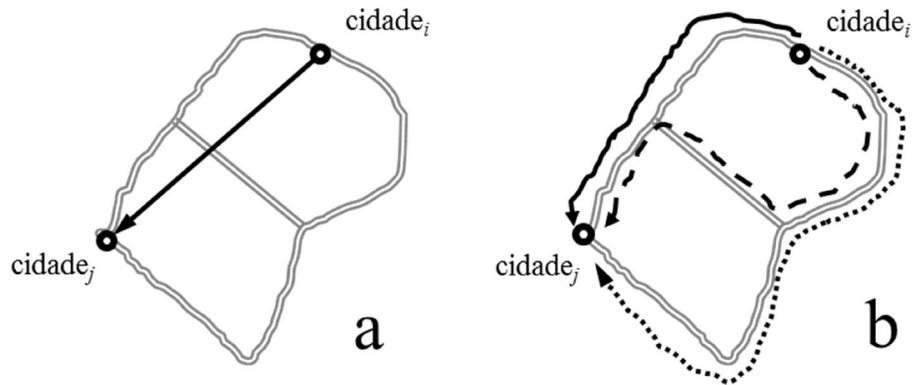


Figura 4. Acesso da cidade_i à cidade_j. (a) Apenas uma alternativa de acesso pela distância euclidiana. (b) Mais de uma alternativa quando utiliza-se a malha viária.

O algoritmo de caminho mínimo utilizado, no presente estudo, foi o de Dijkstra (Dijkstra, 1959). Quando formulado, é capaz de executar em tempo proporcional a $O(V^2)$, em que V é o número de vértices. Porém, se implementado utilizando-se a estrutura de dados *Heap de Fibonacci* (Fredman & Tarjan, 1984) pode alcançar o tempo de execução de $O(|V| \log(|V| + |E|))$, em que E é o número de arcos (Cormen *et al.*, 2009). Pode-se observar que se trata de um algoritmo bastante eficiente.

O algoritmo padrão resolve o problema de caminho mínimo de um vértice-fonte para todos os demais vértices existentes. Porém, ele pode ser facilmente adaptado para resolver o problema entre todos os vértices do grafo. A implementação do algoritmo utilizada nesse trabalho foi a disponibilizada na biblioteca *NetworkX* (Hagberg, 2008), desenvolvida em linguagem de programação Python.

3.5 Otimização do caminhamento

3.5.1 Formulação via problema do caixeiro-viajante

Assim como no acesso às parcelas de inventário, as empresas florestais adotam diferentes estratégias para se determinar o caminhamento a ser feito para visitar todas as parcelas. Geralmente não utilizam nenhum método para otimizar este percurso. Buscou-se, então, desenvolver uma metodologia para preencher essa lacuna do setor florestal brasileiro. Para isso, o problema foi formulado como um problema do caixeiro-viajante. Esse problema é um dos mais estudados em otimização combinatorial (Johnson & McGeoch, 1995). De acordo com Helsgaun (2009), o PCV pode ser entendido da seguinte forma:

Dada uma matriz de custo $C = (c_{ij})$, em que c_{ij} representa o custo associado ao caminho da cidade i para a cidade j ($i, j = 1, \dots, n$), o objetivo é encontrar a permutação $(i_1, i_2, i_3, \dots, i_n)$ de inteiros de 1 até n que minimiza a quantidade: $c_{i_1 i_2} + c_{i_2 i_3} + \dots + c_{i_n i_1}$.

O PCV pode ser classificado como simétrico ou assimétrico; a diferença fundamental é que, no primeiro, o custo de ida e de volta de uma determinada cidade para outra deve ser igual, ou seja, $c_{ij} = c_{ji}$. Uma opção de se obter a solução exata do PCV é através do método de programação dinâmica (Bellman, 1960). Entretanto, a forma mais usual é via formulação por programação inteira. A formulação de Dantzig *et al.* (1954) é uma das mais citadas, principalmente pelo seu pioneirismo. Para uma formulação de performance extrema deve-se consultar o trabalho de Applegate *et al.* (2003). Essa formulação é a base do *software* Concorde. De acordo com Davendra (2010), os PCVs simétrico e assimétrico podem ser formulados da seguinte maneira:

O PCV pode ser definido em relação a um grafo não-direcionado $G = (V, E)$ se ele é simétrico e, em relação a um grafo direcionado $G = (V, A)$, se ele é assimétrico. O conjunto $V = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de vertices (cidades); $E = \{(i, j) : i, j \in V, i < j\}$ é o conjunto de arestas não-direcionadas, referentes ao PCV simétrico; $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ é o conjunto de arestas direcionadas referentes ao PCV assimétrico. A matriz de custo $C = (c_{ij})$ é definida tanto para E quanto para A e satisfaz à desigualdade $c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj}$, para todo i, j, k .

- Problema do Caixeiro-Viajante simétrico:

$$\sum_{i < j} c_{ij} x_{ij}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i < k} x_{ik} + \sum_{j > k} x_{kj} = 2 \quad k \in V$$

$$\sum_{i, j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad (S \subset V, 3 \leq |S| \leq n - 3)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i, j) \in E$$

- Problema do Caixeiro-Viajante assimétrico:

$$\sum_{i \neq j} c_{ij} x_{ij}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (i \in V, i \neq j)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (j \in V, j \neq i)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad (S \subset V, 2 \leq |S| \leq n - 2)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i, j) \in A$$

3.5.2 Formulação via vizinho mais próximo

Para fins de comparação foi implementado o algoritmo do vizinho mais próximo para otimização do caminhamento. Este algoritmo é considerado como uma solução aproximativa para PCV. Esse método de otimização foi escolhido porque, mesmo sem utilizar nenhum algoritmo computacional específico, o executor do inventário tenta, na prática, aplicá-lo intuitivamente. A partir de uma parcela inicial, busca-se seguir para a parcela mais próxima e assim sucessivamente até que se tenha percorrido todas as parcelas. Como o executor normalmente retorna para o local de início do inventário, muitas vezes é mais interessante visitar determinada parcela na volta do que no ida; sendo assim, na grande maioria dos casos esse método apresenta solução inferior quando comparado com algum algoritmo de solução exata. Abaixo encontram-se os passos de execução do algoritmo.

- 1 – Escolha aleatoriamente um vértice.
- 2 – Encontre o vértice mais próximo ainda não visitado e o visite então.
- 3 – Há algum vértice ainda não visitado? Se sim, retorne para o passo 2.
- 4 – Retorne ao vértice inicial.

3.6 Interface gráfica para usuário e integração com um Sistema de Informações Geográficas

Para facilitar e incentivar a utilização, tanto em ambiente acadêmico quanto em empresas florestais, das metodologias de otimização desenvolvidas, ambas foram implementadas em um ambiente com interface gráfica com o usuário. Por se tratarem de feições espaciais, ou seja, as parcelas e estradas são dados que apresentam informação de localização espacial, torna-se imprescindível que essas metodologias estejam integradas a um SIG. Assim, além de facilitar seu uso, essa integração aumenta a sua credibilidade, pois o resultado gerado será apresentado visualmente, permitindo ao usuário perceber todo o contexto espacial da solução ótima.

A metodologia foi implementada na linguagem de programação Python, utilizando-se os recursos da biblioteca desenvolvida em Python (*arcpy*) do software ArcGIS. A ferramenta desenvolvida é completamente integrada ao software ArcGIS, comportando-se como uma ferramenta nativa do software. O fluxograma da ferramenta é apresentado na Figura 5.

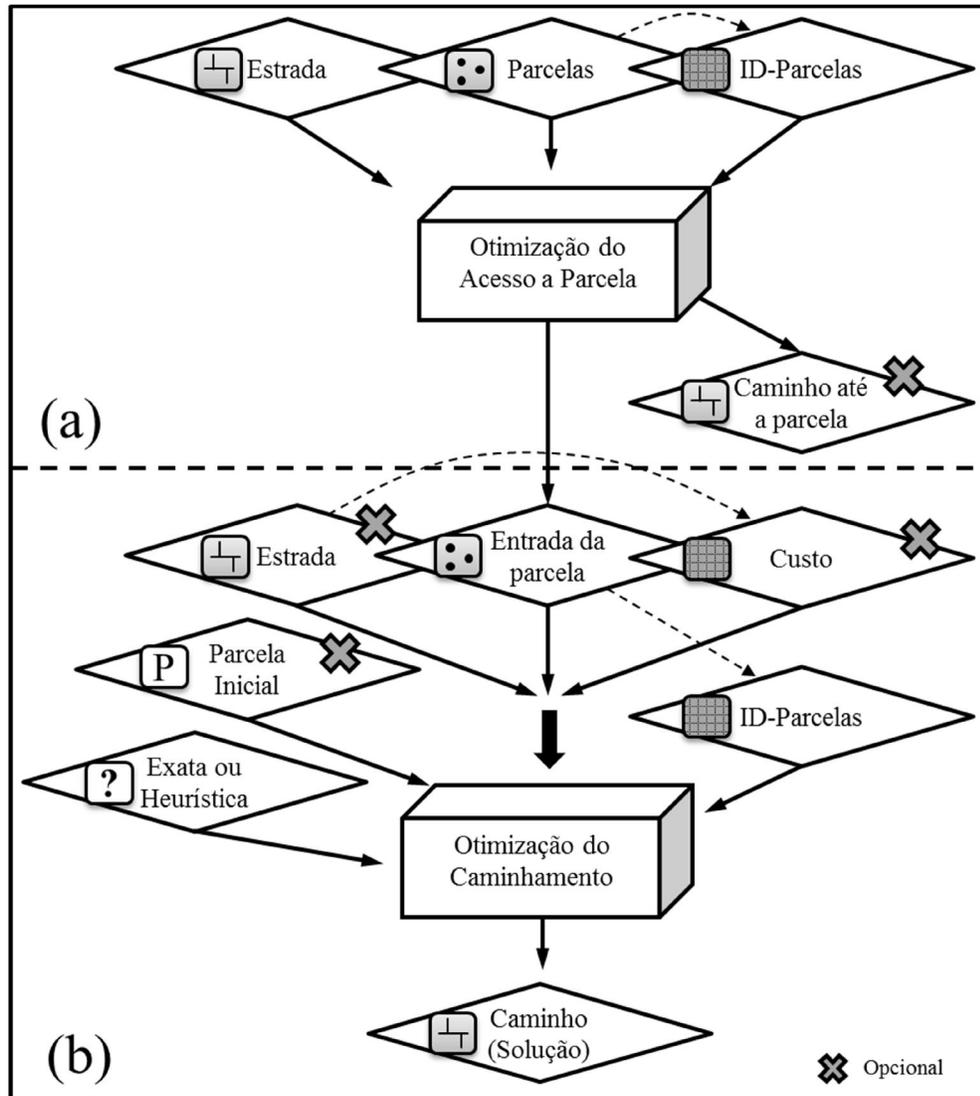


Figura 5. Fluxograma da ferramenta desenvolvida. (a) Implementação da metodologia de otimização do acesso a parcela. (b) Implementação da metodologia de otimização do caminhamento.

As metodologias foram implementadas em funções separadas. A metodologia de otimização de acesso às parcelas apresenta como parâmetros de entrada a feição espacial das estradas (Estrada) do tipo linha, uma feição espacial contendo a localização das parcelas (Parcela) do tipo ponto e um campo da tabela de atributos (ID-Parcela) oriundo da feição espacial “Parcela” contendo o identificador da parcela (chave da parcela). Já os parâmetros de saída são os seguintes: feição espacial (Caminho até a parcela) do tipo linha contendo a representação do caminho da entrada da parcela até a

parcela propriamente dita, sendo este opcional; feição espacial (Entrada da parcela) do tipo ponto, contendo a representação da localização das entradas das parcelas.

A metodologia de otimização do caminhamento apresenta como parâmetros de entrada as seguintes feições: feição espacial (Entrada da parcela) do tipo ponto, obtida do resultado da execução da metodologia anterior; feição espacial (Estrada) do tipo linha (para esta metodologia, esse parâmetro é opcional; caso não seja utilizado, a otimização do caminhamento será baseada na distância euclidiana); campo da tabela de atributos (Custo), oriundo da feição espacial de estrada (Estrada) (este parâmetro também é opcional, caso a feição de estrada seja fornecida, por padrão utiliza-se o comprimento dos segmentos da estrada no processo de otimização; porém, o usuário poderá fornecer outro tipo de custo, e.g. tempo, através desse parâmetro de entrada, desde que esse custo esteja presente na tabela de atributos da feição de estrada); um campo da tabela de atributos (ID-Parcela) oriundo da feição espacial “Entrada da parcela” contendo o identificador da parcela; a informação da parcela inicial no formato texto (este parâmetro opcional é útil para assinalar a parcela em que se deve iniciar o inventário); e por fim, um parâmetro booleano questionando se o usuário deseja obter a solução exata (método *cutting-plane*) ou solução heurística (heurística de Lin-Kernighan). O parâmetro de saída será uma feição espacial do tipo linha, contendo a representação do caminhamento ótimo. Além disso, a tabela de atributos dessa feição contém a sequência que deverá ser seguida, a informação de qual é a parcela atual, a próxima a ser inventariada, o custo do percurso entre as parcelas e, com isso, pode-se então obter o custo total.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Otimização do acesso às parcelas

Mostra-se, na Tabela 2, a distância total que deverá ser percorrida, de acordo com a quantidade de parcelas a serem inventariadas, sendo que a Repetição 1 refere-se a parcelas realmente existentes em campo. Percebe-se, para cada repetição, uma elevação gradual nas distâncias totais, apresentando uma relação aproximadamente linear com a quantidade de parcelas (Figura 7), contribuindo, assim, para elevar a variabilidade dentro das repetições. O desvio padrão de cada quantidade de parcela apresentou-se reduzido e, como se pode observar, não houve grandes diferenças entre as parcelas de campo e as parcelas geradas aleatoriamente.

Tabela 2. Solução ótima para o acesso às parcelas de inventário, contendo a distância total para cada quantidade de parcelas (20, 40, 60, 80) e suas repetições, bem como suas médias e desvio padrão (DP).

Cenários	Distância Total (m)				Médias
	Número de Parcelas				
	20	40	60	80	
Repetição 1	1.453,18	3.861,39	5.222,40	7.576,22	4.528,30
Repetição 2	1.620,66	4.233,25	4.928,19	8.479,46	4.815,39
Repetição 3	1.623,96	3.979,14	6.429,22	7.984,08	5.004,10
Repetição 4	2.278,12	4.948,88	5.848,92	7.889,49	5.241,35
Médias	1.743,98	4.255,66	5.607,18	7.982,31	4.897,28
DP	364,91	487,50	669,15	374,47	

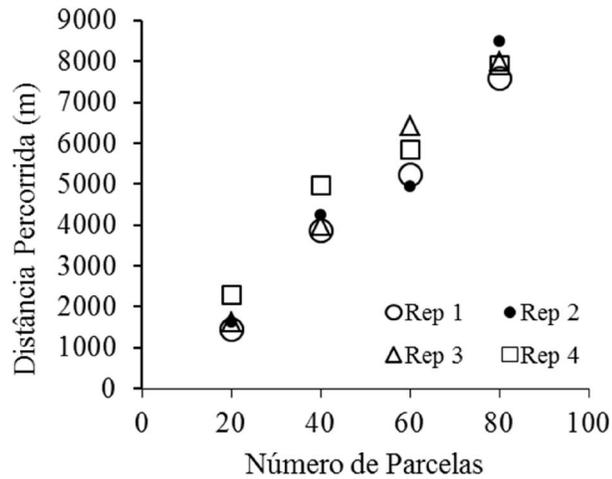


Figura 6. Distância total gerada pela solução da otimização do acesso às parcelas em função do número de parcelas.

A elevação das distâncias com o aumento da quantidade de parcelas é coerente para esse tipo de estratégia de acesso à parcela (1ª Estratégia) pois, à medida que a intensidade amostral aumenta, torna-se interessante inventariar mais de uma parcela antes de se retornar à estrada. Assim, observa-se na Figura 7 um comportamento assintótico da curva de distância percorrida com relação ao aumento do número de parcelas inventariadas. O número de parcelas que corresponde ao ponto P é desconhecido e de difícil quantificação, sendo também influenciado pelo tamanho dos talhões e pelo traçado das estradas. Não é, porém, um fator crítico, pois existe sempre a opção de se formular o problema de otimização de forma a incorporar a combinação das duas estratégias.

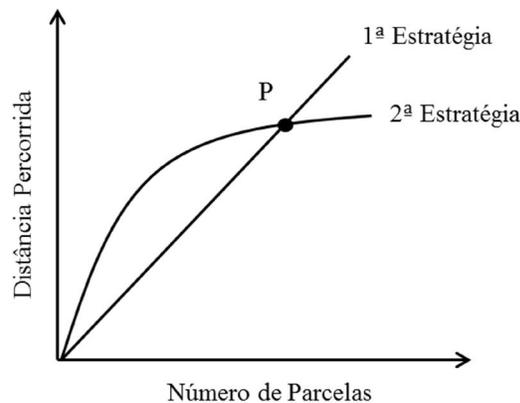


Figura 7. Comportamento da distância percorrida em função do número de parcelas, em uma área amostral constante, para as duas estratégias de acesso à parcelas de inventário.

Os tempos de execução do algoritmo do vizinho mais próximo foram omitidos, pois, para essas instâncias, foram considerados desprezíveis (menores que 1 segundo), além de apresentarem pouca variabilidade. Mesmo para instâncias consideravelmente maiores, estima-se que o algoritmo se comporte de forma eficiente, pois o mesmo apresenta tempo de execução proporcional a $O(n \log n)$, em que n é o número de pontos, desde que seja implementado utilizando-se a estratégia de “dividir e conquistar” (Shamos & Hoey, 1975). Vale lembrar que, ainda que se utilize um algoritmo de força-bruta (*brute-force*), pode-se obter um tempo proporcional a $O(n^2)$.

A rugosidade do relevo não foi considerada no processo de otimização, mas seria, sem sombra de dúvida, o primeiro investimento no aperfeiçoamento da metodologia apresentada. Liu & Wong, (2010) desenvolveram uma metodologia para se resolver o problema do caminho mínimo considerando a superfície do terreno. Estes autores adaptaram os algoritmos convencionais, concebidos originalmente para trabalharem com dados bi-dimensionais. Para aumentar o desempenho do algoritmo, desenvolveram adicionalmente um método de simplificação da superfície de um modelo TIN (*Triangular Irregular Network*), visto a elevada demanda computacional necessária para se resolver um problema como este.

4.2 Otimização do caminhamento

Os resultados da solução do problema do caixeiro-viajante via formulação de programação linear inteira, para o cenário em questão, podem ser observados na Tabela 3. Essa tabela contém informações acerca da distância total para cada repetição e da quantidade de parcelas, além de conter as respectivas médias e desvios-padrão (DP). As distâncias foram apresentadas como valores inteiros, uma imposição do software Concorde. Assim, foi necessário o arredondamento prévio dos custos para a correta execução do algoritmo.

Tabela 3. Solução exata para o caminhamento às parcelas de inventário, contendo a distância total para cada quantidade de parcelas (20, 40, 60, 80) e suas repetições, bem como suas médias e desvio padrão (DP).

Cenários	Distância Total (m)				Médias
	Número de Parcelas				
	20	40	60	80	
Repetição 1	13.729	17.480	20.642	21.524	18.343,75
Repetição 2	12.194	15.077	20.058	21.204	17.133,25
Repetição 3	14.447	16.310	18.327	20.618	17.425,50
Repetição 4	14.099	17.099	21.316	20.240	18.188,50
Médias	13.617,25	16.491,50	20.085,75	20.896,50	17.772,75
DP	993,09	1.061,44	1.280,22	576,45	

A variabilidade referente a cada repetição e à quantidade de parcelas apresentaram o mesmo comportamento da solução do acesso à parcela, ou seja, valores elevados para as repetições e baixos para número de parcelas. A diferença marcante no comportamento é que a distância total tende a estagnar na faixa próxima a 60 parcelas, conforme ilustrado na Figura 8. Isso aparentemente ocorre pela elevada intensidade amostral proporcionada pelas quantidades de parcelas 60 e 80.

A área total dos talhões da área de estudo é 331,92 ha; então, a respectiva intensidade amostral para os números de parcelas 20, 40, 60 e 80 é 1:16,6; 1:8,3; 1:5,5 e 1:4,1. O valor de uma parcela para 5,5 ha já é considerado uma intensidade elevada. Devido à grande quantidade de parcelas, o caminhamento obrigatoriamente deverá passar por quase todos segmentos das estradas.

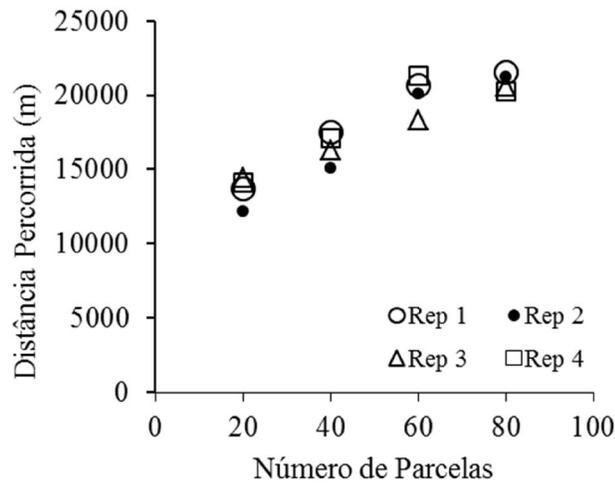


Figura 8. Distância total gerada pela solução da otimização do caminhamento via formulação por programação linear inteira, em função do número de parcelas.

Comportamento similar foi observado na resolução aproximada do PCV, via algoritmo do vizinho mais próximo, como se pode observar na Tabela 4 e na Figura 9.

Tabela 4. Solução aproximada para o caminhamento às parcelas de inventário, contendo a distância total para cada quantidade de parcelas (20, 40, 60, 80) e suas repetições, bem como suas médias e desvios-padrão (DP).

Distância Total (m)					
Cenários	Número de Parcelas				Médias
	20	40	60	80	
Repetição 1	16.250	21.313	23.261	25.987	21.702,57
Repetição 2	15.193	21.463	23.840	26.093	21.647,38
Repetição 3	17.788	18.310	20.464	26.380	20.735,53
Repetição 4	14.805	23.595	24.727	22.694	21.455,30
Médias	16.009,12	21.169,95	23.073,20	25.288,51	21.385,20
DP	1.334,03	2.173,14	1.840,84	1.737,64	

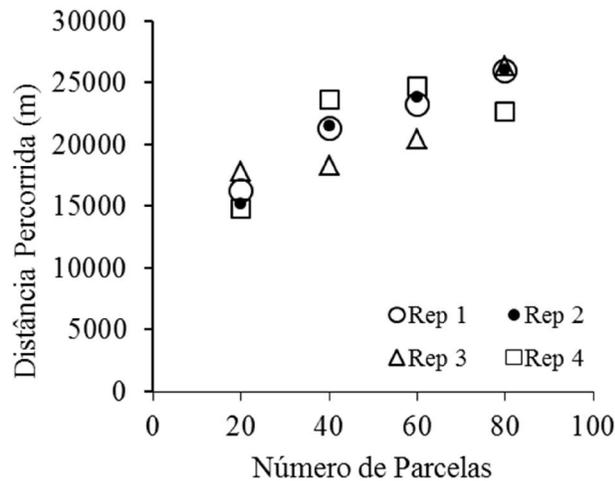


Figura 9. Distância total gerada pela solução da otimização do caminhamento via algoritmo do vizinho mais próximo em função do número de parcelas.

A diferença marcante entre os dois métodos é a qualidade de solução (Figura 10), a média geral de distância para a solução exata é de 17.772,75 m enquanto que, para a solução aproximada, é de 21.385,20 m, uma diferença de aproximadamente 17%.

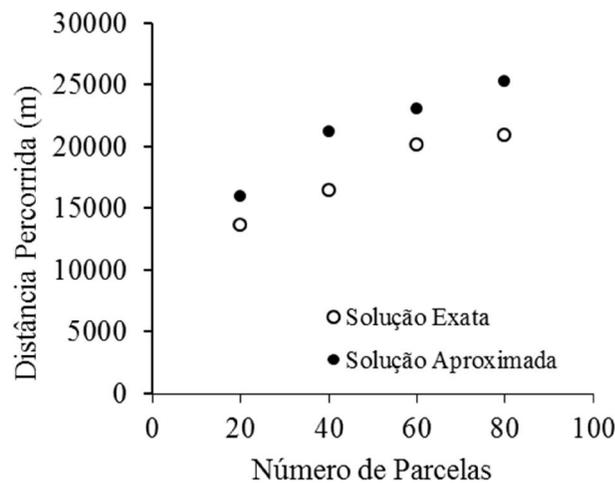


Figura 10. Distância total média gerada pela solução via formulação inteira e via algoritmo do vizinho mais próximo em função do número de parcelas.

Karl Menger, nos anos 1930, além de definir a forma geral do PCV, constatou que o método do vizinho mais próximo não garantia solução ótima para o PCV e que, na maioria dos casos, não era a melhor rota. Outros trabalhos também já demonstraram que o método do vizinho mais próximo produz resultados bem piores do que quando formulados como um problema de programação inteira (Cirasella *et al.*, 2000; Gutin *et*

al.; 2002; Glover *et al.*, 2001). Na Tabela 5 apresentam-se as diferenças percentuais entre os dois métodos de otimização.

Tabela 5. Solução ótima vs solução aproximada [$100 * (1 - \text{Exata}/\text{Aproximada})$] para o caminhamento às parcelas de inventário para cada quantidade de parcelas (20, 40, 60, 80) e suas repetições, bem como suas médias e desvio padrão (DP).

Solução Exata vs Aproximada (%)					
Cenários	Número de Parcelas				Médias
	20	40	60	80	
Repetição 1	15,51	17,98	11,26	17,17	15,48
Repetição 2	19,74	29,75	15,87	18,74	21,02
Repetição 3	18,78	10,92	10,44	21,84	15,50
Repetição 4	4,77	27,53	13,80	10,81	14,23
Médias	14,70	21,55	12,84	17,14	16,56
DP	6,86	8,73	2,47	4,64	

No presente estudo, o algoritmo do vizinho mais próximo apresentou, em média, um caminhamento 16,56% mais longo que o algoritmo de solução exata. De acordo com Johnson & McGeoch (1997) esses percentuais alcançam em média 25% quando se utiliza o algoritmo do vizinho mais próximo. Apesar de apresentar desempenho ruim, esse método aproximado foi escolhido como fonte de comparação por se considerar que, na prática o executor do inventário florestal, intuitivamente, tenta aplicá-lo. Existem métodos aproximativos que alcançam qualidade de solução muito superior a esta, por exemplo, a heurística de Lin & Kernighan, cujos resultados, em geral, diferem de apenas 1 a 2% do valor da solução exata (Johnson & McGeoch, 1995).

Pela sua característica gulosa, em algumas situações o algoritmo do vizinho mais próximo assinala um caminhamento que notoriamente não é a melhor alternativa. Isso ocorre quando se isola algum vértice do problema e que, posteriormente, requer percorrer um longo caminho para se visitá-lo. Sendo assim, o usuário, em algumas situações, pode melhorar a resposta do algoritmo de forma manual. Entretanto, se a demanda pelo serviço for alta, a adaptação manual torna-se inviável.

Devido à grande quantidade de inventários que uma empresa florestal realiza ao longo do tempo, um aumento em torno de 17% na eficiência do caminhamento seria suficiente para se obterem benefícios significativos. Esse aumento pode ser ainda maior,

pois, na prática, as empresas florestais brasileiras geralmente não adotam nenhuma estratégia de otimização, seja para encontrar o ponto mais próximo da estrada à parcela ou a utilização do algoritmo do vizinho mais próximo para se obter o caminhamento. As metodologias aqui discutidas, além de propiciarem redução nos custos, auxiliam no controle de qualidade do inventário, pois é possível calcular o tempo de percurso para cada segmento do caminhamento.

4.3 Interface gráfica para usuário e integração com um Sistema de Informações Geográficas

As metodologias desenvolvidas foram implementadas em um ambiente com interface gráfica para o usuário e integradas a um SIG, fazendo com que o processo seja completamente automatizado. Foi criada uma caixa de ferramenta (*toolbox*) nativa do software ArcGIS, sendo que as metodologias foram implementadas em funções distintas. As etapas de execução do conjunto de ferramentas são ilustradas na Figura 11. As formatações presentes nas feições de saída nas figuras 12b e 12c são padrões da ferramenta. Observe que o caminho gerado possui numeração, indicando a seqüência do caminhamento e seta, indicando o sentido.

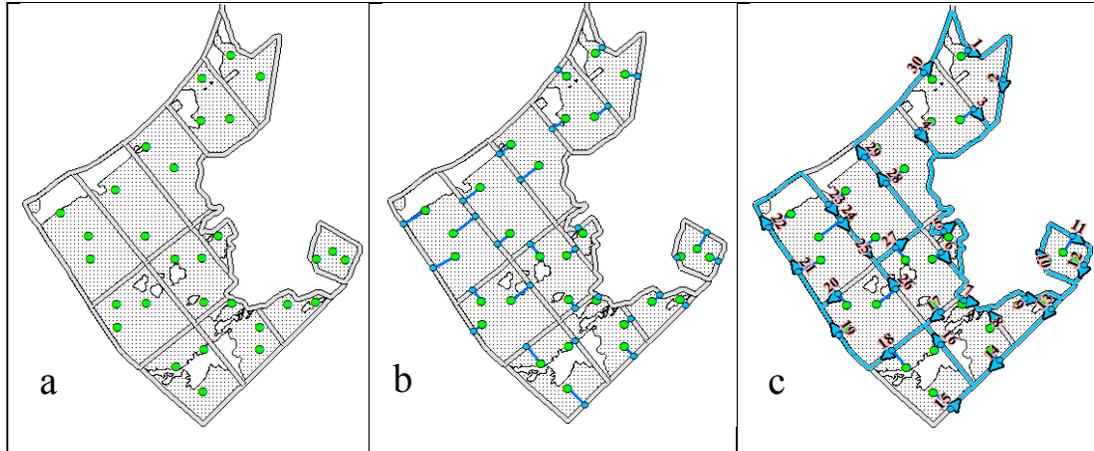


Figura 11. Sequência de operações realizadas; (a) localização das estradas, talhões e parcelas a serem inventariadas; (b) determinação dos pontos de acesso às parcelas e (c) caminhamento ótimo.

A partir das feições de estrada e parcelas executa-se a primeira função (otimização do acesso às parcelas), cujo resultado é mostrado na Figura 11b. O próximo passo é executar a função de otimização do caminhamento, obtendo-se o caminhamento ilustrado na Figura 11c.

Na Figura 12 apresenta-se a interface da ferramenta específica para se otimizar o acesso às parcelas.

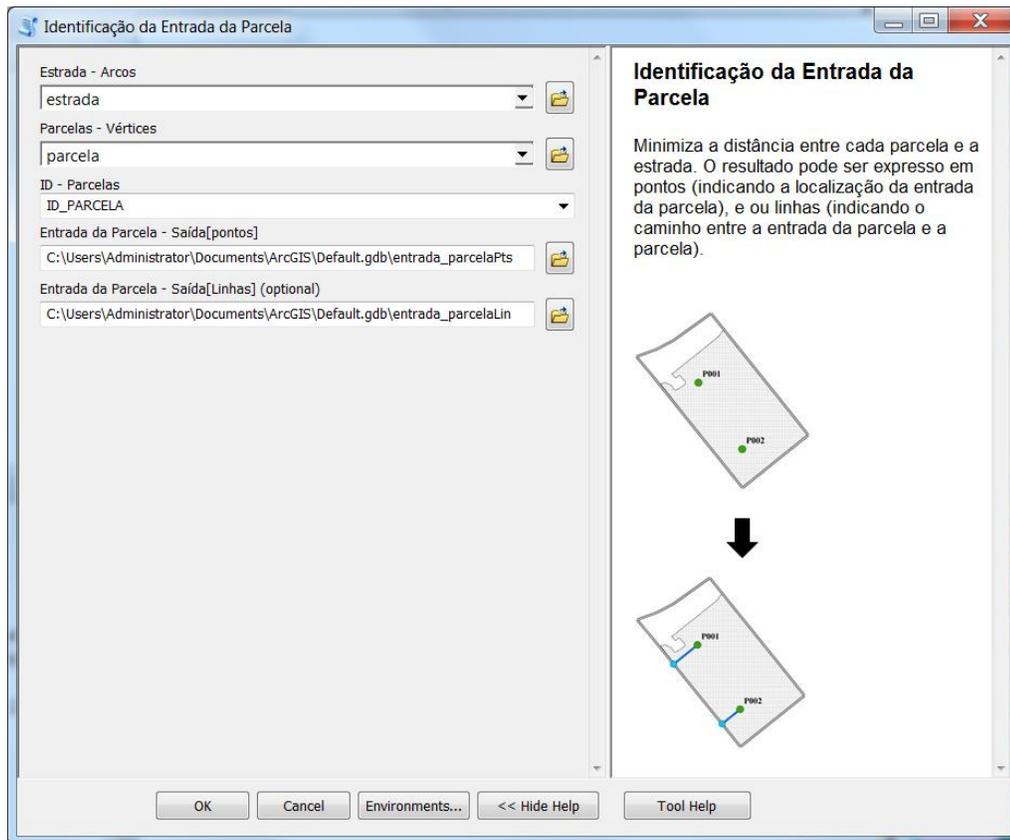


Figura 12. Interface gráfica da ferramenta para otimizar o acesso às parcelas.

As ferramentas apresentam comportamento análogo ao das demais ferramentas do ArcGIS, incluindo o material de ajuda para o usuário. A Figura 13 ilustra a interface da ferramenta para otimização do caminhamento das parcelas de inventário.

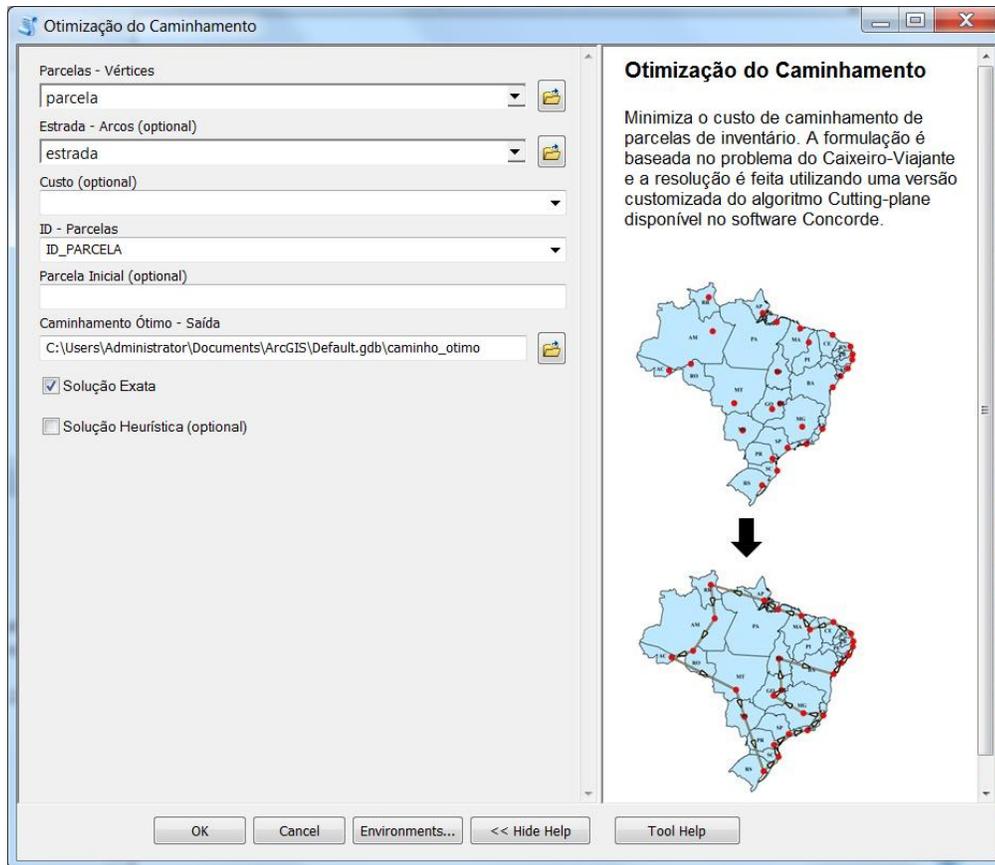


Figura 13. Interface da ferramenta para otimizar o caminhamento das parcelas de inventário.

O parâmetro referente à feição espacial de estradas é opcional. Se não for fornecido, a ferramenta resolverá um problema do caixeiro-viajante euclidiano, utilizando-se da métrica da distância euclidiana para cálculo do custo do percurso entre as parcelas. Na Figura 14 apresentam-se duas situações: uma em que se adota a distância euclidiana para se gerar o caminhamento entre as parcelas, e outra em que se utiliza a informação da estrada para o cálculo do custo. Mostra-se, adicionalmente, a identificação da localização das entradas das parcelas.

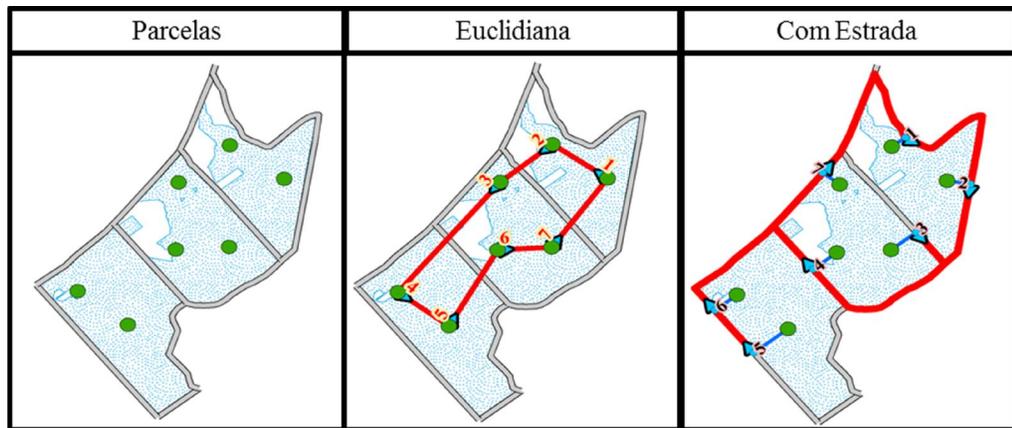


Figura 14. Caminhamento utilizando a distância euclidiana e a informação de estrada para cálculo do custo entre as parcelas.

A Figura 15 exemplifica o resultado gerado pelas ferramentas para um cenário de 30 parcelas que inclui, além das feições espaciais, a apresentação da tabela de atributos da feição de entrada “Parcelas” (painel à esquerda). Essa tabela contém a distância da entrada da parcela até a parcela propriamente dita. No painel à direita, apresenta-se a tabela de atributos da feição “Caminho Ótimo”, que contém a sequência do percurso, a informação da parcela atual e próxima a ser inventariada e também o custo associado entre cada parcela. O somatório desses custos fornece o custo total (tempo, distância, etc) de caminhamento.

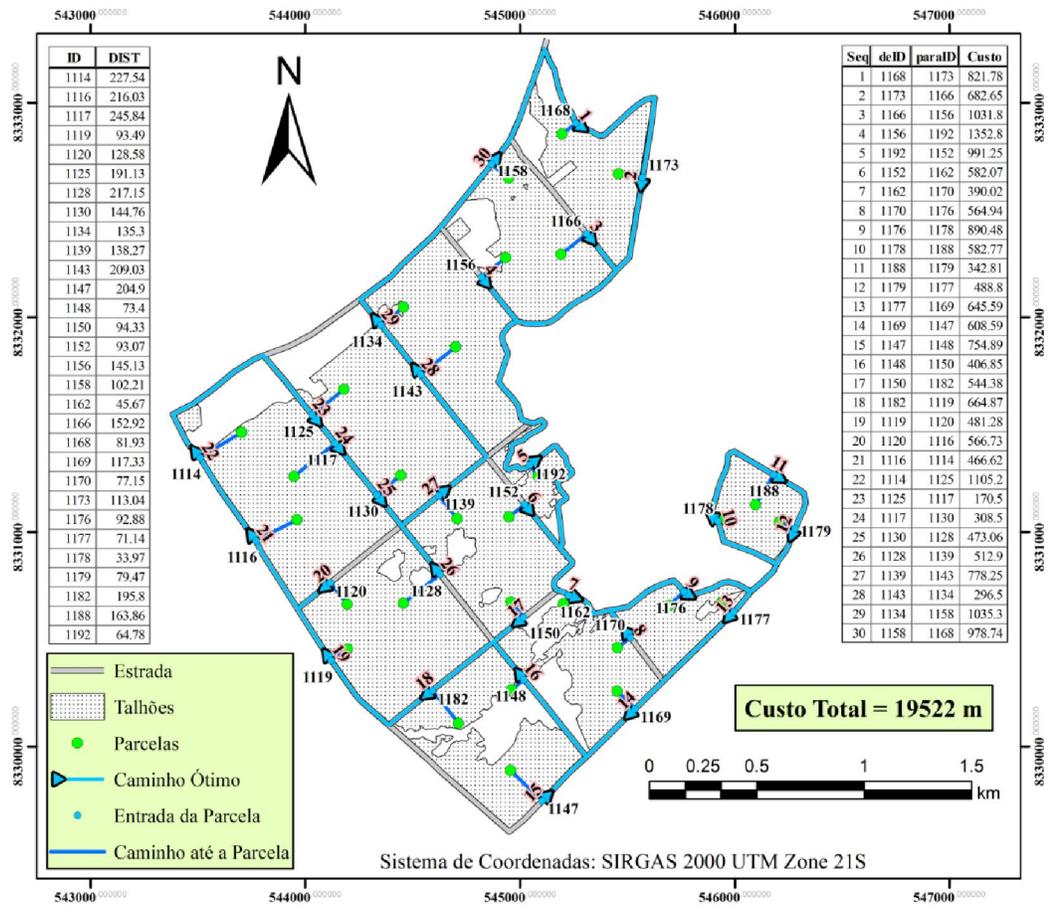


Figura 15. Exemplo do caminhamento ótimo para 30 parcelas.

5 CONCLUSÕES

- A metodologia desenvolvida para o acesso às parcelas otimiza o caminhamento entre a estrada e as parcelas de inventário florestal, e sua implementação computacional permite que seja feito de forma automatizada. Com isso, aumenta-se a eficiência tanto do planejamento do inventário quanto de sua execução.
- A metodologia desenvolvida para o caminhamento otimiza o percurso total entre as parcelas a serem inventariadas. A solução exata mostrou-se muito superior à solução aproximada, que intuitivamente é feita em campo, sendo em média 17% menor.
- A implementação das metodologias em ambiente com interface gráfica para o usuário e integrada a um SIG, incentiva e facilita a utilização desta abordagem ótima, auferindo maior credibilidade aos métodos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPLEGATE, D.L.; BIXBY, R.E.; CHVÁTAL, V.; COOK, W. **The Traveling Salesman Problem: A Computational Study**. 1ª ed. Princeton: Princeton University Press. 2006. 606p.
- APPLEGATE, D.L.; BIXBY, R.E.; CHVÁTAL, V.; COOK, W.; ESPINOZA, D.G.; GOYCOOLEA, M.; HELSGAUN, K. Certification of an optimal TSP tour through 85,900 cities. **Operations Research Letters**. v.37, n.1, p.11-15, 2009.
- APPLEGATE, D.L.; BIXBY, R.E.; CHVÁTAL, V.; COOK, W.J. Concorde TSP Solver. 2004. Disponível: <http://www.tsp.gatech.edu/concorde/index.html>.
- APPLEGATE, D.L.; BIXBY, R.E.; CHVÁTAL, V.; COOK, W.J. Implementing the Dantzig–Fulkerson–Johnson algorithm for large scale traveling salesman problems. **Math Program Ser B**, v. 97, p. 91-153, 2003.
- BELLMAN, R. Combinatorial processes and dynamic programming. In: BELLMAN, R.; HALL, J.M (Eds). **Combinatorial Analysis. Proceedings of Symposia in Applied Mathematics**. v.10, p.217-249, 1960.
- CHUNG, W.; DYKSTRA, D.; BOWER, F.; O'BRIEN, S.; ABT, RICHARD; SESSIONS, J. User's guide to SNAP for ArcGIS®: ArcGIS interface for scheduling and network analysis program. **General Technical Report**. PNW-GTR-847. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 2012. 34p.
- CIRASELLA, J.; JOHNSON, D. S.; MCGEOCH, L. A.; ZHANG, W. The asymmetric traveling salesman problem: algorithms, instance generators and tests, **Proceedings 3rd Workshop on Algorithm Engineering and Experiments**. Washington DC. 2001.
- COOK, W. J. **In Pursuit of the Traveling Salesman: Mathematics at the Limits of Computation**. 1º ed. Princeton: Princeton University Press. 2012. 272 p.
- CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to Algorithms**. 3.ed. MIT Press. 2009. 1312p.

- DANTZIG, G.; FULKERSON, R.; JOHNSON, S. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. **Operations Research**. v.2, p.393-410. 1954.
- DAVENDRA, D. **Traveling Salesman Problem. Theory and Applications**. 1^a ed. Tech Publishing. 2010. 298p.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connection with graphs. **Numerische Mathematik**. v.1, p.269-271. 1959.
- DORIGO M.; GAMBARDELLA, L. M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**. v.1, n.1, p.53-66. 1997.
- DORIGO M.; STÜTZLE, T. **Ant Colony Optimization**. MIT Press. Cambridge, MA. 2004.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B**. v.26, n.1, p.29-41. 1996.
- DURBIN R.; WILLSHAW D. An analogue approach to the travelling salesman problem using an elastic net method. **Nature**. v.326, p.689-691. 1987.
- E.S.R.I. – Environmental Systems Research Institute. ESRI. (USA), 2013.
- FREDMAN, M. L.; TARJAN, R. E. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. **Journal of the Association for Computing Machinery**. v.34, n.3, p.596-615. 1987.
- GLOVER, F.; GUTIN, G.; YEO, A.; ZVEROVICH, A. Construction heuristics for the asymmetric TSP. **European Journal of Operational Research**. v.129, p.555-568, 2001.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. 1^a.ed. Addison Wesley, Reading, MA. 1989. 432p.
- GUTIN, G.; YEO, A.; ZVEROVICH, A. Traveling salesman should not be greedy: domination analysis of greedy-type heuristics for the TSP. **Discrete Applied Mathematics**. v.117, p.81-86, 2002.

- HAGBERG, A. A.; DANIEL A.; SCHULT AND PIETER J. SWART. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. In: VAROQUAUX, G.; VAUGHT, T.; MILLMAN, J. (Eds). **Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008)**. Pasadena, CA, USA, p.11-15, 2008.
- JOHNSON, D.S.; MCGEOCH, L.A. The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization, November 20. 1995. 103p. Disponível em: <http://www.cs.ubc.ca/~hutter/previous-earg/EmpAlgReadingGroup/TSP-JohMcg97.pdf>.
- JOHNSON, D.S.; MCGEOCH, L.A. The traveling salesman problem: A case study in local optimization. In: E. H. L. AARTS, E. H. L.; LENSTRA, J. K. (Eds). **Local search in combinatorial optimization**. John Wiley and Sons, Ltd. p. 215-310. 1997.
- KIRKPATRICK, S.; GERLATT, C. D. JR.; VECCHI, M.P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**. v.220, p.671-680. 1983.
- LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. **Operations Research**. v.21, p.498-516. 1973.
- LIU, L.; WONG, R. C. Finding shortest path on land surface. **Proceedings - ACM-SIGMOD International Conference on Management of Data**. p.433-444. 2010.
- MÄKINEN, A.; KANGAS, A.; NURMI, M. Using cost-plus-loss analysis to define optimal forest inventory interval and forest inventory accuracy. **Silva Fennica**. v.46, n.2, p.211-226. 2012.
- MARTIN, G. E. **The Foundations of Geometry and the Non-Euclidean Plane**. 1^a ed. Intext, Educational Publishers, NY. Springer. 1982. 509p.
- MELLO, J. M. **Geostatística aplicada ao inventário florestal**. Piracicaba, SP: Esalq, 2004, 110p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.
- NOTHDURFT, A.; SABOROWSKI, J.; BREIDENBACH, J. Spatial prediction of forest stand variables. **European Journal of Forest Research**. v.128, n.3, p.241-251. 2009.

REINELT, G. **TSPLIB 95. Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR)**. Heidelberg. 1995.

REMSOFT INC. 2012. Disponível: <http://www.remsoft.com>.

RODRÍGUEZ, A.; RUIZ, R. The effect of the asymmetry of road transportation networks on the traveling salesman problem. **Computers & Operations Research**. v.39, p.1566-1576. 2012.

SEDGEWICK, R. **Algorithms in C⁺⁺**. 3^a ed. Pearson Education. 1998. 752p.

SHAMOS, M. I.; HOEY, D. Closest-point problems. **Proceedings of the 16th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)**. IEE Computer Society, Los Alamitos. p.151-162. 1975.

SIVANANDAM, S.N.; DEEPA, S.N. **Introduction to genetic algorithms**. 1^a ed. Berlin Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. 462p.