

Roteirização em arcos com um sistema de informações geográficas para transportes: aplicação em coleta de resíduos sólidos urbanos

[Arc routing using geographic information system for transportation: an application in urban solid waste system]

Renato da Silva Lima*, Josiane Palma Lima, Thiago Vitali De Vito Silva

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Brazil

Submitted 30 Jan 2012; received in revised form 9 Feb 2012; accepted 9 Feb 2012

Resumo

O objetivo do trabalho é utilizar o Sistema de Informações Geográficas (SIG) como ferramenta para a roteirização do sistema de coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU). A partir da base de dados geográficos do sistema viário de Itajubá (MG), foram georeferenciados os dados relativos à coleta de RSU da empresa responsável por prestar o serviço na cidade. De posse desses dados, foram simulados no SIG cenários de roteirização nos setores de coleta, utilizando a rotina de roteirização em arcos do SIG. As simulações possibilitaram avaliar a qualidade das rotas atuais e possíveis cenários de melhoria, visando à minimização da distância percorrida e, conseqüentemente, a redução dos custos envolvidos. Os resultados gerais mostraram que a rotina de roteirização presente no SIG é adequada e oferece resultados de boa qualidade, desde que as variáveis mais sensíveis do problema (taxa de geração de resíduos e velocidade dos caminhões) sejam obtidas com precisão.

Palavras-Chave: sistema de informações geográficas para transportes; roteirização; resíduos sólidos urbanos.

Abstract

The objective of this paper is to use the Geographic Information System (GIS) as a routing tool for urban solid waste (USW) systems. The data from the vehicle used in the USW collection system was put in the GIS database, obtained directly from the company responsible for the service in Itajubá city (MG). With this data, scenarios of the routing system were simulated in GIS, using the GIS ArcRouting algorithm. The goal of the simulations was to evaluate the quality of the current route system and sought solutions that minimize the distance covered by the vehicles and, consequently, the reduction of the involved costs. The general results showed the GIS ArcRouting algorithm to be adequate and as obtaining good results, since that the most important problem's variables (tax of waste generation and vehicle speed) are attained with precision.

Key words: geographic information system for transportation; arc routing; urban solid waste.

* Email: rslima74@gmail.com.

Recommended Citation

Lima, R. S., Lima, J. P. and Silva, T. V. V. (2012) Roteirização em arcos com um sistema de informações geográficas para transportes: aplicação em coleta de resíduos sólidos urbanos. *Journal of Transport Literature*, vol. 6, n. 2, pp. 180-196.

■ JTL|RELIT is a fully electronic, peer-reviewed, open access, international journal focused on emerging transport markets and published by BPTS - Brazilian Transport Planning Society. Website www.transport-literature.org. ISSN 2238-1031.

This paper is downloadable at www.transport-literature.org/open-access.

1. Introdução

O gerenciamento dos resíduos sólidos em áreas urbanas baseia-se, historicamente, na coleta e disposição dos resíduos pela administração pública em locais apropriados. Quando executado com eficiência, a coleta mais organizada e a disposição em locais distantes dão a sensação de eficiência na gestão pública à população. Além disso, os elevados custos operacionais envolvidos no manejo dos resíduos sólidos urbanos (RSU) comprovam a importância dessas atividades na administração pública. Para o estabelecimento da melhor relação entre a satisfação da população com o serviço prestado e os aspectos de qualidade, custos, atendimento e proteção a saúde pública, deve-se buscar a otimização do processo de coleta dos RSU com a utilização de tecnologias disponíveis. O problema de coleta enquadra-se entre os problemas de Roteirização de Veículos (PRV), classe de problema bastante frequentes na área de Pesquisa Operacional nas últimas décadas (Pelizaro, 2000), especificamente classificado como o de roteirização em arcos.

Com o crescimento nas últimas décadas da utilização dos computadores e da capacidade de processamento dos mesmos, softwares específicos vêm sendo desenvolvidos para resolver os problemas de roteirização, os chamados roteirizadores (Galvão, 1997). No entanto, muitos deles pecam por não serem capazes de abordar a componente espacial do problema, como por exemplo, a localização geográfica exata dos pontos a serem atendidos (clientes) ou a consideração das restrições de tráfego rodoviário, trabalhando com médias ou distâncias euclidianas. Uma das alternativas para esse problema é a utilização de roteirizadores como módulos associados a uma plataforma de um Sistema de Informação Geográfica (SIG). O SIG, de modo mais amplo, é uma ferramenta que permite manipular dados georeferenciados e alfanuméricos para, a partir de análises espaciais, apoiar a tomada de decisão espacial, como a definição do melhor roteiro de entregas a ser seguido.

De uma maneira geral o cálculo dos roteiros para a coleta de RSU é feito manualmente, em mapas considerando os sentidos das vias e as características da área servida (frequência e horário de coleta). Os roteiros são ainda, muitas vezes, definidos aleatoriamente pelo motorista do caminhão coletor, de modo empírico, resultando em serviços ineficientes e de baixa qualidade. Desse modo, muitos municípios brasileiros operam com sistemas de coleta

de RSU sub ou super dimensionados. Diante dessas condições existe a necessidade de se buscar uma alternativa que associe dados operacionais à tecnologia disponível, em particular, às ferramentas disponibilizadas em um Sistema de Informações Geográficas.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é utilizar o Sistema de Informações Geográficas (SIG) como ferramenta para a roteirização do sistema de coleta de resíduos sólidos urbanos. A partir da atualização e adequação da base de dados geográficos digital do sistema viário de Itajubá (MG), foram georeferenciadas os dados relativos ao atual sistema de coleta de lixo urbano da empresa responsável por prestar o serviço na cidade. De posse desses dados, foram simulados no SIG cenários de roteirização nos setores de coleta, buscando avaliar a qualidade dos roteiros atuais e possíveis cenários de melhoria, visando à minimização da distância percorrida e, conseqüentemente, a redução dos custos envolvidos.

2. Sistemas de Informações Geográficas - SIG

Um SIG pode ser considerado como um tipo de sistema de informação que envolve de forma sistêmica e interativa bancos de dados, tecnologia e pessoal, sendo capaz de realizar análises espaciais, armazenar, manipular, visualizar e operar dados georeferenciados para obtenção de novas informações (Câmara, 1994).

Os SIG combinam os avanços das cartografias automatizadas, dos sistemas de manipulação de bancos de dados e do sensoriamento remoto com o desenvolvimento metodológico em análise geográfica, para produzir um conjunto distinto de procedimentos analíticos que auxiliam no gerenciamento e na atualização constante das informações disponíveis. O SIG oferece o ferramental operacional que auxilia e acelera procedimentos de planejamento, gerências e tomadas de decisões, e que por isso vem sendo utilizado de forma cada vez mais promissora em diferentes áreas (Farkuh e Lima, 2005).

A popularização dos computadores via redução do seu custo, juntamente com o aumento de seu desempenho e desenvolvimento de sistemas computacionais gráficos, a partir dos anos 80 fez com que os modelos computacionais da Pesquisa Operacional passassem por uma fase de reavaliação: o papel dos modelos de otimização da PO face os avanços da microcomputação e das novas tecnologias relacionadas à computação gráfica passou a ser bastante discutido.

Ficou evidente que esses modelos teriam cada vez mais que ser embutidos em sistemas computacionais gráficos, de forma transparente ao usuário não-especialista. Em particular, com o surgimento dos SIG, abriram-se amplas perspectivas para a inserção de modelos computacionais da PO nestes sistemas de informação (Lima, 2003).

Lima (2003) afirma que a partir da década de 80 ocorreram mudanças significativas nos rumos da aplicação do SIG, onde se busca um melhor aproveitamento do potencial de análise do SIG. Em fases anteriores o SIG foi utilizado para manipular/visualizar banco de dados e posteriormente para realizar operações analíticas com dados numéricos, sempre partindo de dados estatísticos obtidos através de pesquisas. Na fase atual a capacidade de realização da análise espacial, tem sido apontada como fundamental para distinção entre outros sistemas de informação e o SIG, caracterizando-os cada vez mais como Sistemas de Apoio à Decisão Espacial (SADE).

Mais especificamente, o software TransCAD, um SIG para Transportes, possibilita a definição de redes, viagens, matrizes e tem uma série de algoritmos desenvolvidos especificamente para transportes, fornecendo uma funcionalidade adicional às tradicionais ferramentas disponíveis em um SIG. Possui ainda módulos específicos que abordam problemas de logística e roteirização, tais como, problemas de fluxo em rede, localização de instalações e roteirização em arcos e em nós.

3. Roteirização e programação de veículos

Para Cunha (2000) e Goela e Gruhn (2008) a roteirização é o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou seqüências de paradas a serem cumpridos por veículos de uma frota, tendo por objetivo utilizar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento. A roteirização pode ser caracterizada por n clientes (representados numa rede de transportes por nós ou arcos) que deverão ser servidos por uma frota de veículos, sem apresentarem restrições ou ordem que deverão ser atendidos. Deste modo, representa uma configuração espacial do movimento do veículo em uma rede (Bose, 1990). A programação, por sua vez, refere-se à definição dos aspectos temporais de um ou mais roteiros, mais especificamente aos horários de cada uma das tarefas ou eventos

importantes, ou ainda a prioridade no atendimento ou cumprimento de um horário. Representa assim uma configuração temporal (Bose, 1990; Cunha, 2000;).

Considerando Bodin et al. (1983), Assad (1991) e Laporte et al. (2000), observa-se que as principais características dos problemas de roteirização e programação são: tamanho da frota disponível, tipo de frota, garagem dos veículos, natureza da demanda, localização da demanda, características da rede, restrições de capacidade dos veículos, requisitos de pessoal, tempos máximos de rotas, operações envolvidas, custos, objetivos e outras restrições (variáveis do problema).

Embora os problemas de roteirização de veículos apresentem variações, pode-se de um modo geral reduzi-los segundo a origem e destino do trajeto e segundo o tipo de modelagem (nó ou arco). Quanto à origem e destino, há o problema de se encontrar um trajeto em uma rede onde o ponto de origem seja diferente do ponto de destino, em que os pontos de origem e de destino são coincidentes, ou em que existam múltiplos pontos de origem e de destino. Adicionalmente, segundo Cunha (2000), com relação ao ambiente de distribuição, os problemas reais de roteirização podem ser divididos em dois grupos: Roteirização em meio urbano, em que tanto os atendimentos quanto a base localizam-se na mesma área urbana e os percursos do roteiro são predominantemente urbanos e a Roteirização intermunicipal, na qual os atendimentos localizam-se em municípios distintos da base e entre si e os percursos do roteiro são predominantemente rodoviários. Em geral, os problemas de roteirização em meio urbano tendem a ser mais complexos do ponto de vista da sua natureza combinatória, uma vez que há um número maior de alternativas de caminhos e, conseqüentemente, de roteiros viáveis. Adicionalmente, há restrições à circulação de veículos, e incertezas quanto aos tempos de viagem. Na distribuição intermunicipal (rodoviária), as distâncias entre pontos de atendimento, em geral, diferentes cidades, são geralmente longas, e podem ser determinadas a partir de dados facilmente acessíveis e disponíveis da malha rodoviária de interesse. A densidade da malha rodoviária é baixa face às distâncias a serem percorridas. Além disso, são menores as incertezas associadas às restrições e condicionantes de tráfego.

3.1 Classificação dos problemas de roteirização

A classificação dos problemas de roteirização segue aqui a proposta por Bodin et al. (1983), já tomada como referência por diversos autores (Cunha, 2003, Diniz, 2000, Naruo, 2003,

Pelizaro, 2000; Nagy e Salhia, 2007). Segundo Cunha (2003), apesar do trabalho ser relativamente antigo, ainda representa umas das principais referências bibliográficas sobre o assunto.

A divisão proposta pelos autores considera as restrições geográficas e espaciais, dividindo assim os problemas em três grupos: problema de roteirização pura, de programação de veículos e tripulações e de roteirização e programação. Os problemas de roteirização pura são problemas espaciais que não consideram as variáveis temporais ou precedências entre as atividades para elaboração dos roteiros de coletas e/ou entrega. Em alguns casos têm-se apenas a restrição de comprimento máximo da rota. Neste tipo de problema existe um conjunto de nós e/ou arcos para serem atendidos que formarão uma seqüência de locais (rota), buscando alcançar a minimização do custo total de transporte. Já os problemas de programação de veículos e tripulações podem ser considerados como problemas de roteirização com restrições adicionais relacionadas ao tempo quando várias atividades precisam ser executadas. Finalmente os problemas de roteirização e programação envolvem relações de precedência entre as atividades envolvidas e também restrições de janelas de tempo (horário de atendimento e outros). Podem ser considerados como uma combinação de problemas de roteirização e programação. São problemas que frequentemente surgem na prática e representam aplicações do mundo real. Apresentam restrições mais realistas, onde cada parada pode ter volumes a serem coletados ou entregues. Uma importante variação desse problema é o problema de roteirização e programação de veículos com janelas de tempo (PRPVJT), onde os pontos para atendimento têm uma ou mais janelas de tempo durante o qual o serviço pode ser executado.

3.2 Roteirização aplicada à coleta de RSU

O problema de percurso na coleta de resíduos sólidos domiciliares é definir um conjunto de rotas que atendem a um conjunto de determinadas áreas. Este problema está relacionado ao Problema de Percursos em Arcos ou Problema de Roteirização em Arcos (Arc Routing Problem – ARP). Nos Problemas de Roteirização em Arcos (ARPs), o objetivo é determinar o menor custo de travessia sobre um conjunto de arcos especificados de um grafo, com ou sem restrições (Eiselt et al., 1995).

O SIG TransCAD inclui um procedimento de roteirização em arco, com ferramentas para mostrar e trabalhar com rotas que atravessam um conjunto de ligações em uma rede de transporte. A rotina utilizada para o roteirização em arco é denominada Arc Routing. Segundo Deluqui (1998), o TransCAD utiliza o método de programação linear para roteirização em arco. O algoritmo toma como solução inicial um número mínimo de nós a serem carregados, verificando se a solução pode ser melhorada. Quando consegue ligar o nó de origem ao de destino, utilizando-se o número mínimo possível de ligações e minimizando o número de ligações percorridas sem a realização do serviço, o algoritmo pára de carregar os nós. Após a resolução do problema de roteirização em arco, o TransCAD exhibe relatórios de saída de dados e o sistema de rota de forma gráfica. A visualização da rota na tela permite a consulta direta ao relatório de itinerário quando se deseja obter mais detalhes sobre a rota do veículo no setor de coleta.

4. Modelagem e simulação em um caso real

4.1 Descrição

Itajubá é uma cidade localizada ao Sul do estado de Minas Gerais. No que diz respeito à coleta de resíduos sólidos urbanos, o percentual de atendimento é de 100% na área urbana (área de estudo deste trabalho). Em contato com a Prefeitura do Município e com a empresa responsável pela realização do serviço, foram levantados os dados essenciais para que se efetuasse a roteirização no SIG TransCAD (versão acadêmica 4.8).

A coleta de RSU é feita com a utilização de 05 caminhões. Atualmente, a Empresa responsável pela coleta fez a divisão da cidade para a coleta em 5 setores, na qual cada setor está inserido em um roteiro A e um roteiro B. O roteiro A é realizado nos dias de segunda, quarta e sexta-feira. O roteiro B é realizado nos dias de terça, quinta e sábado. Dentro de cada setor com respectivo roteiro A ou B, está inserido um grupo de bairros. Cada setor tem a sua coleta realizada por um caminhão, tendo como equipe 1 motorista e 4 funcionários coletores por caminhão. O ponto de partida dos caminhões é a sede da própria Empresa, de onde saem e retornam do serviço diariamente. O ponto de destino dos resíduos é atualmente o depósito de resíduos, que será em breve substituído por um aterro sanitário (em fase de conclusão). Os roteiros são definidos baseados unicamente na experiência dos motoristas, de modo empírico.

4.2 Aplicação do Software

Para a aplicação da rotina de roteirização no TransCAD foram adotados os mesmos setores que são utilizados na coleta realizada pela Empresa. Tal procedimento foi adotado para que seja possível a comparação entre o percurso realizado pela Empresa e o percurso que será calculado pelo TransCAD em todos os setores. Os bairros estão inseridos nos setores as quais são listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Bairros e setores da cidade utilizados pela empresa de coleta de RSU

Setor	Roteiro	Bairros
1	A	Porto Velho, BPS/Pinheirinho e Centro
1	B	Boa Vista
2	A	Varginha, Imbel, Vila Ana Rocha e Porto Velho
2	B	Cruzeiro, Oriente, Vila do Arco e Estiva
3	A	Medicina e Anhumas
3	B	Avenida e São Vicente
4	A	Morro Chic, Vila Rubens, Loteamento São José, Vila Isabel, Capetinga, Caminho do Brejo e Novo Horizonte
4	B	Cafona, Jardim das Colinas, Santos Dumont, São Judas Tadeu, Vista Verde, Vila Pódis, Santo Antonio
5	A	Jardim das Palmeiras, Rebourgeon, Piedade, Capituba, Ilhéus, Nações e Santa Luzia
5	B	Canta Galo, Água Limpa, São Pedro, Estância, Pedra Preta, Santa Rosa, São Sebastião, Nossa Senhora de Fátima e Cantina

A base de dados geográficos da cidade, apresentada na Figura 1, foi disponibilizada por meio de projetos anteriores e assim ela foi georeferenciada com os dados necessários a aplicação da rotina *Arc Routing*.

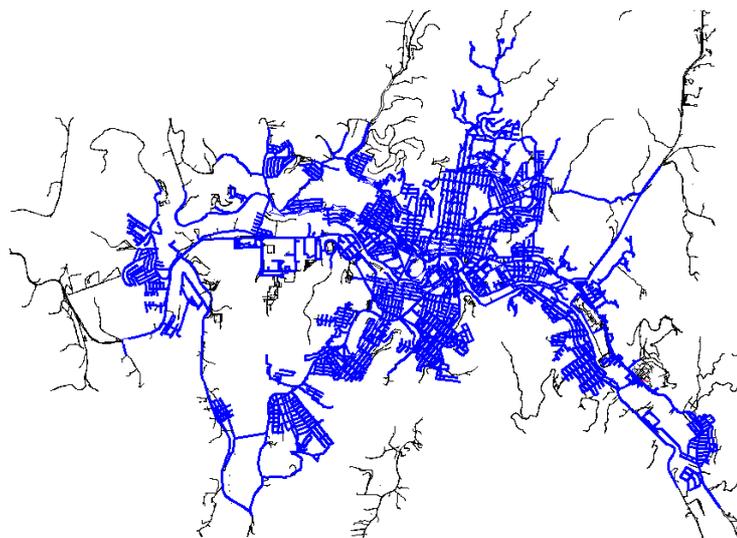


Figura 1 - Base viária de Itajubá

A aplicação da rotina *Arc Routing* foi realizada em duas etapas: identificação da garagem e do depósito no arquivo geográfico de nós e o preenchimento dos campos da base de dados da camada de linhas. A Tabela 2 apresenta cada campo pertencente à base de dados da camada de linhas com a respectiva função.

Tabela 2 - Campos da base de dados de linha

Campo	Função
Service Type AB/BA	Corresponde à bandeira de serviço dos setores, ou seja, o número de entrada significa qual é o setor em que o link(rua) está inserido.
Service Time	É o tempo médio em horas para realização do serviço (coleta) na passagem daquela rua. Obtido a partir da divisão da distância (Lenght) pela velocidade média do caminhão coletor nesta via, que é em torno de 6 Km/h de acordo com a Empresa responsável.
Deadhead Time	É o tempo médio em horas nas ruas em que se não tem realização do serviço (coleta). Obtido a partir da divisão da distância (Lenght) pela velocidade média do caminhão coletor nesta via, que é em torno de 40 Km/h de acordo com a Empresa responsável.
Service Load	Corresponde à quantidade de carga que será recolhida em cada rua.
Deadhead Load	Corresponde à carga de trabalho nas ruas que não são servidos. Estipulou-se zero para se balancear o peso do resíduo coletado em cada turno.
Passes	Corresponde ao número de passagens requeridas em cada rua para a realização do serviço.

Para o campo Service Load, Empresa Vina não possuía nenhuma estimativa da quantidade de resíduos gerados em cada rua. Assim, utilizou-se a média de resíduos gerados por metro linear do trabalho de Castro e Faria (2007), que calcularam o valor para a cidade de Uberlândia (MG) de, que era de 0,170 ton/km de via. Desta forma, admitindo-se que essa taxa se mantenha na mesma ordem de grandeza para cidades médias, multiplicou-se esse valor pelo comprimento de cada rua, podendo-se assim preencher o campo Service Load. Com a base de dados pronta, criou-se a rede de transportes, considerando restrições de movimento para retornos em U. Para realizar a aplicação da rotina *Arc Routing* escolheu-se o atributo Minimize Lenght (Minimizar a distância percorrida nas rotas), pois a empresa responsável pela coleta forneceu a distância real percorrida pelos caminhões nos setores de estudo para a realização de toda a coleta e o tempo médio de coleta nos setores, apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente, o que permitiu a comparação direta com os valores obtidos pelo TransCAD.

Tabela 3 - Distância média para coleta nos setores em estudo

Setor	Distância Média percorrida em Km	Setor	Distância média percorrida em Km
1 – Roteiro A	70	3 – Roteiro B	42
1 – Roteiro B	45	4 – Roteiro A	72
2 – Roteiro A	82	4 – Roteiro B	86
2 – Roteiro B	60	5 – Roteiro A	84
3 – Roteiro A	52	5 – Roteiro B	83

Tabela 4 - Tempo médio para realização da coleta nos setores em estudo

Setor	Tempo Médio em horas	Setor	Tempo Médio em horas
1 – Roteiro A	7,0	3 – Roteiro B	5,0
1 – Roteiro A	4,5	4 – Roteiro A	8,5
2 – Roteiro A	9,0	4 – Roteiro B	9,0
2 – Roteiro B	5,0	5 – Roteiro A	10,5
3 – Roteiro A	4,0	5 – Roteiro B	8,0

Foi necessária a criação de Shifts (Turnos), uma vez que os caminhões utilizados possuem como limitante a capacidade de armazenamento. Assim, existem setores nos quais é necessária mais de uma viagem (Turno), uma vez que a capacidade máxima do caminhão é atingida sem que ainda se tenha percorrido todas as ruas do setor. Para se criar os turnos utilizou-se o caminhão de capacidade máxima permitida por turno, que no presente estudo é de 4 toneladas.

Os dados fornecidos pela empresa responsável pela coleta indicam que em média é feita 2 viagens por setor. Esta é uma informação não muito clara na empresa, uma vez que este parâmetro varia em função do dia da semana que se realiza a coleta. A rotina de roteirização em arco foi então aplicada com o objetivo de minimizar os percursos percorridos.

4.3 Resultados obtidos

Percebeu-se, inicialmente, que não seria possível simular o deslocamento do veículo coletor até a disposição final (Depósito), pois o software considera que o veículo sai de um ponto (Garagem) e retorna ao mesmo ponto (Garagem). Como se sabe esta não é a situação real, uma vez que o caminhão realiza a coleta, descarrega no Depósito, se necessária mais coleta retorna ao setor, realiza-a e a descarrega no Depósito novamente e por fim retorna a Garagem. Desta forma, a distância fornecida pela rotina não leva em consideração os deslocamentos até

o Depósito. Assim, por meio do procedimento Shortest Paths (Caminho Mínimo) presente no TransCAD, que verifica qual é a distância entre uma origem e um destino, foi possível verificar qual era o deslocamento entre o ponto em que o caminhão completava a sua capacidade e tinha que se deslocar até o aterro, o deslocamento entre o aterro ao último ponto de coleta para dar continuidade à rotina ou deslocamento do aterro à Garagem caso toda a coleta tenha sido realizada. A título de exemplo, são apresentados a seguir os resultados detalhados das análises realizadas para o Setor 1, roteiros A e B.

No Setor 1 – Roteiro A verificou-se que para a realização da coleta, seria necessário percorrer um percurso de 31,98 km ($23,52+4,94+2,43+1,09$, incluindo ruas em serviço e sem serviço), necessitando de 2 viagens, coletando um total de 4,41 ton. O percurso referente aos descarregamentos no aterro e retorno para a garagem foi de 25 km, resultando em uma distância total de 56,98 km. O tempo para realização do serviço seria de 6,13 h ($4,74+0,71+0,59+0,09$, incluindo ruas em serviço e sem serviço), enquanto o tempo referente aos deslocamentos para aterro e garagem seria de 0,63 h, resultando em um tempo total de 6,76 h. As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, o mapa das rotas e os resultados alfanuméricos da base de dados do SIG do Setor 1- roteiro A.

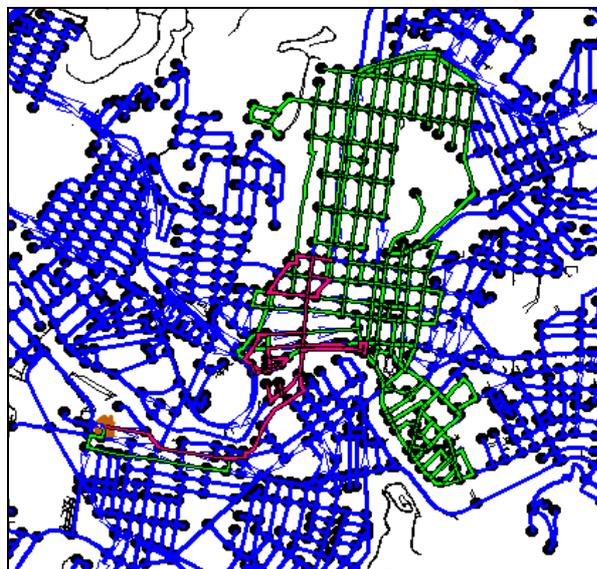


Figura 2 - Rotas para o Setor 1 – Roteiro A

TransCAD - [Dataview2 - ARP Routes]

File Edit Map Dataview Selection Matrix Layout Tools Procedures Networks/Paths Route Systems Routing/Logistics Window Help

All Records

Shift	Load	DHCost	Links	DHLinks	TurnPenalty	LeftTurns	RightTurns	UTurns	StraightTurns	S_Length	D_Length	[Service Time]	[Deadhead Time]
1	4.00	4.94	597	121	150.00	166	205	15	210	23.52	4.94	4.74	0.71
2	0.41	1.09	85	24	40.00	24	20	4	36	2.43	1.09	0.59	0.09

Obs.: S_Length – Distância percorrida nas ruas em serviço (com coleta).
D_Length – Distância percorrida nas ruas sem serviço (sem coleta).

Figura 3 - Resumo das rotas do Setor 1 – Roteiro A

No Setor 1 – Roteiro B o percurso total percorrido seria de 21,87 km (20,22 +1,65), necessitando de 1 viagem, coletando um total de 3,44 ton. O percurso referente ao descarregamento no aterro e retorno para a garagem foi de 11 km, resultando em uma distância total de 32,87 Km. O tempo para realização da coleta seria de 4,20 h (3,65+0,55), enquanto o tempo referente aos deslocamentos para aterro e garagem seria de 0,28 h, resultando em um tempo total de 4,48 h. As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, o mapa das rotas e os resultados alfa-numéricos da base de dados do SIG do Setor 1- roteiro B.

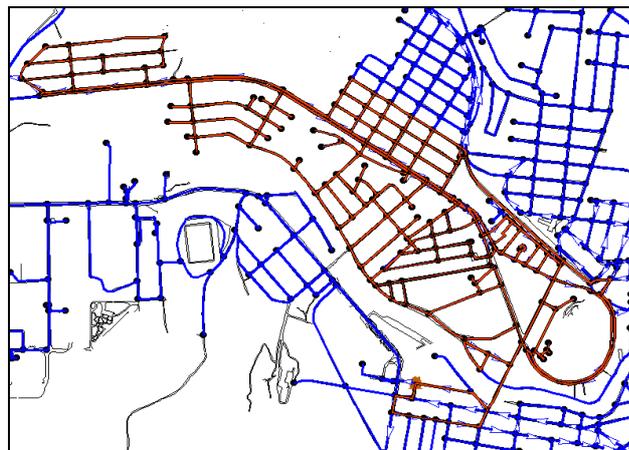


Figura 4 - Rotas para o Setor 1 – Roteiro B

TransCAD - [Dataview2 - ARP Routes]

File Edit Map Dataview Selection Matrix Layout Tools Procedures Networks/Paths Route Systems Routing/Logistics Window Help

All Records

Shift	Load	DHCost	Links	DHLinks	TurnPenalty	LeftTurns	RightTurns	UTurns	StraightTurns	S_Length	D_Length	[Service Time]	[Deadhead Time]
1	3.44	1.65	472	39	300.00	144	153	30	144	20.22	1.65	3.65	0.55

Obs.: S_Length – Distância percorrida nas ruas em serviço (com coleta).
D_Length – Distância percorrida nas ruas sem serviço (sem coleta).

Figura 5 - Resumo das rotas do Setor 1 – Roteiro B

A Tabela 5 apresenta a descrição detalhada dos resultados quantitativos para todos os setores. A Tabela 6 apresenta um resumo com os resultados quantitativos obtidos nos cenários do SIG, bem como a comparação com os resultados da Empresa responsável pela coleta.

Tabela 5 - Resultados gerais da roteirização no SIG

Setor	Roteiro	(1) km	(2) vg.	(3) ton	(4) km	(5) km	(6) h	(7) h	(8) h
1	A	31,98	2	4,41	25,0	56,98	6,13	0,63	6,76
1	B	21,87	1	3,44	11,0	32,87	4,20	0,28	4,48
2	A	44,36	2	6,60	29,9	74,26	8,50	0,75	9,25
2	B	22,60	1	3,22	12,2	34,80	4,34	0,31	4,65
3	A	19,05	1	3,06	11,6	30,65	3,66	0,29	3,95
3	B	25,02	1	3,97	10,2	35,22	4,80	0,26	5,06
4	A	42,78	2	6,60	22,1	64,88	8,20	0,55	8,75
4	B	48,42	2	7,49	16,6	65,02	9,25	0,42	9,67
5	A	61,63	3	9,21	20,7	82,33	11,81	0,52	12,33
5	B	39,02	2	5,63	34,4	73,42	7,47	0,86	8,33

Em que:

(1): Percurso total percorrido em roteirização, incluindo ruas em serviço e sem serviço (km);

(2): Numero de viagens necessárias (viagens);

(3): Total coletado (ton);

(4): Percurso total percorrido entre o descarregamento no aterro e retorno na garagem (km);

(5): Distância total (km) = (1)+(4);

(6): Tempo total em roteirização, incluindo ruas em serviço e sem serviço (h);

(7): Tempo total percorrido entre o descarregamento no aterro e retorno na garagem (km);

(8): Tempo total (h) = (6)+(7)

Tabela 6 - Dados fornecidos pela Empresa responsável pela coleta e resultados do SIG

Setor	Roteiro	(1) km	(2) km	(3) %	(4) h	(5) h	(6) %
1	A	70	56,98	18,6%	7,0	6,76	3,4%
1	B	45	32,87	27,0%	4,5	4,48	0,4%
2	A	82	74,26	9,4%	9,0	9,25	-2,8%
2	B	60	34,8	42,0%	5,0	4,65	7,0%
3	A	52	30,65	41,1%	4,0	3,95	1,3%
3	B	42	35,22	16,1%	5,0	5,06	-1,2%
4	A	72	64,88	9,9%	8,5	8,75	-2,9%
4	B	86	65,05	24,4%	9,0	9,67	-7,4%
5	A	84	82,33	2,0%	10,5	12,33	-17,4%
5	B	83	73,42	11,5%	8,0	8,33	-4,1%

Em que:

(1): Distância total percorrida fornecida pela empresa responsável (km);

(2): Distância total percorrida obtida através do SIG (km);

(3): Redução percentual da distância obtida com o uso do SIG;

(4): Tempo total fornecido pela empresa responsável (h);

(5): Tempo total obtido através do SIG (h);

(6): Redução percentual do tempo obtido com o uso do SIG;

As informações constantes dos resumos de rotas dos setores apresentadas anteriormente permitiram uma avaliação quantitativa dos parâmetros operacionais do serviço de coleta domiciliar. Em termos gerais, os valores encontrados para o parâmetro distância, obtidos pelo SIG apresentaram melhores resultados em relação aos valores reais fornecidos pela Empresa responsável, indicando percursos mais eficientes calculados pelo software. Nota-se que houve uma redução máxima de 42%, caso do Setor 2 – Roteiro B. A média percentual de redução foi de 20%. Esta melhoria significativa obtida na solução do SIG pode ser explicada por dois motivos: (i) o veículo coletor tem uma menor passagem por deadheadings (ruas em que não se tem realização de coleta) em relação à situação real; (ii) como a carga de serviço é estipulada a partir de uma média de resíduos gerados por metro linear de via, o valor obtido na simulação em determinadas ruas pode ser inferior ao real, resultando em um número de viagens menor que a situação real. Em outras palavras, significa que o SIG pode estar simulando uma taxa de geração de resíduos menor do que a real. Essa constatação caracteriza a taxa de geração de resíduos como um parâmetro extremamente importante e sensível para obtenção dos roteiros.

Para o parâmetro tempo, em termos gerais, não se pode dizer que os resultados obtidos pelo SIG foram melhores que os reais fornecidos pela Empresa responsável, uma vez que vários setores apresentaram um aumento do tempo para execução da coleta, chegando a um aumento máximo de 17,4%, caso do Setor 5 – Roteiro A. A explicação para esse desempenho aparentemente ruim do SIG parece estar mais no valor de velocidade média dos caminhões utilizado na modelagem: pelos tempos maiores encontrados pelo TransCAD em alguns casos mesmo com grandes reduções de distância, parece que os caminhões trafegam numa velocidade média maior do que a supostamente real (declarada pela empresa).

Conclusões

O objetivo do trabalho foi utilizar um Sistema de Informações Geográficas (SIG) como ferramenta para a roteirização do sistema de coleta de resíduos sólidos urbanos. Foram simulados no SIG cenários de roteirização nos setores de coleta da cidade de Itajubá, MG, buscando avaliar a qualidade das rotas atuais e possíveis cenários de melhoria, visando à minimização da distância percorrida nos percursos e, conseqüentemente, a redução dos custos envolvidos.

De maneira geral, a modelagem do trabalho por meio de um SIG como plataforma operacional permitiu integrar e inter-relacionar informações disponíveis dentro do processo de tomada de decisão, considerando fatores que podem ocorrer em uma situação real. No entanto, ao se avaliar o TransCAD como ferramenta de roteirização, é importante destacar algumas simplificações que se fizeram necessárias na fase de modelagem. Uma delas foi para contornar uma restrição do SIG, que não considera o local de descarga na rotina de roteirização. O veículo parte da garagem e atravessa todas as vias que necessitam ser atendidas e em seguida retorna a garagem. Devido a esta simplificação, foi necessário utilizar um procedimento complementar de cálculo de caminhos mínimos para que a simulação se tornasse a mais próxima possível da real. Desta forma, conclui-se que uma restrição do TansCAD nesse tipo de aplicação é a dificuldade para tratar situações nas quais os pontos de origem e destino são distintos. Ainda assim, a utilização do SIG permitiu que a roteirização de veículos fosse realizada com uma base de dados mais precisa, tornando possíveis simulações alternativas de rotas para coleta de resíduos sólidos urbanos.

Do ponto de vista quantitativo, os resultados obtidos mostraram que a roteirização com o uso do TransCAD reduziu o percurso total (distâncias) dos veículos coletores, comprovando que é possível a redução de custos diretos durante a fase de planejamento. No entanto, há que se averiguar o valor utilizado para a taxa média de geração de resíduos junto à empresa responsável pela coleta, uma vez que reduções de percurso na ordem de 40% parecem ser demasiadamente altas, indicando que essa taxa parece estar subestimada. Com relação aos tempos totais dos roteiros, os resultados do SIG foram muitas vezes piores (rotas mais demoradas) do que os tempos reais, possivelmente porque os valores de velocidade média dos caminhões fornecidos pela empresa são menores do que os de fato ocorrem na prática. Alguns cenários gerados possibilitaram comprovar essa hipótese, mas o que se pode de fato afirmar é que o modelo se mostrou bastante sensível aos parâmetros velocidade operacional e taxa média de geração de resíduos da cidade. Assim sendo, sugere-se um levantamento mais preciso dos valores de velocidade, com a utilização de um aparelho GPS dentro do caminhão, acompanhando o serviço de coleta e obtendo dados de velocidade em cada rua com maior precisão.

Finalmente, como conclusão geral, acredita-se que a aplicação no caso em particular foi de grande valia para que se pudessem identificar os parâmetros necessários, problemas e

obstáculos existentes para a utilização do SIG como ferramenta de roteirização de veículos em arcos, especificamente em coleta de resíduos sólidos urbanos. Espera-se que essa experiência possa auxiliar a outros pesquisadores interessados em realizar aplicações similares.

Referências

- Assad, A. A. (1991). Modeling and Implementation Issues in Vehicle Routing. In: *Vehicle Routing: Methods and Studies*, edited by: Golden, B.L; Assad, A. A. v.16, p. 127- 148, second impression.
- Bodin, L. D.; Golden. B.; Assad, A.; Ball, M. (1983). Routing and Scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers and Operations Research*, v.10, n.2.
- Bose, R. de C. A. (1990). *Modelos de Roteirização e Programação de entregas em redes de transportes*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo. 171p.
- Câmara, G. (1994). Anatomia de um SIG. *Fator GIS*, Curitiba, n.4, p.11-15, jan./mar.
- Castro, L. B.; Faria, C. A. (2007). Cadastramento e Otimização de Rotas e Setores do Serviço de Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares com o Uso de GPS e Programa TransCAD. 24^o. *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro. Anais.
- Cunha, C. B. (2000). Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. *Transportes*, v.8, n.2, p.51-74.
- Cunha, C. B. (2003). Um Modelo Matemático para o Problema de Seqüenciamento e Programação de Visitas de Gerentes de Banco. *Gestão & Produção*, v.10, n.2, p.183-196, 2003.
- Deluqui, K. K. (1998). *Roteirização para Veículos de Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares Utilizando um Sistema de Informação Geográfica – SIG*. 1998, 218p. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Diniz, U. L. (2000). *Dimensionamento de frotas de veículos para apoio a maquinário de usinas sucroalcooleiras*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. 163p.
- Farkuh Neto, A.F.; Lima, R. S. (2006). Roterização de veículos de uma rede atacadista com o auxílio de sistemas de informações geográficas (SIG). *Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção*. n.5, p.18 – 39, Junho.
- Galvão, R. D. (1997). Roteamento de Veículos com Base em Sistemas de Informação Geográfica. *Gestão e Produção*, v. 4, n. 2, p. 159-173.
- Goela, A. e Gruhnb, V. (2008). A General Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, v. 191, n.3, p.650-660.
- Laporte, G.; Gendreau, M.; Potvin, J.Y.; Semet, F. (2000). Classical and Modern Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *International Transactions in Operational Research*, v.7, n. 4/5, p. 285-300.
- Lima, R. S. (2003). *Bases para uma metodologia de apoio à decisão para serviços de educação e saúde sob a ótica dos transportes*. 200p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

- Melo, A. C. da S. e Filho, V. J. M. F. (2001). Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos. *Pesquisa Operacional*, v.21, n.2, p. 223-232.
- Nagy, G e Salhia, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, v.177, n.2, p. 649-672
- Naruo, M. K. O. (2003). Estudo do consórcio entre municípios de pequeno porte para disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos, utilizando Sistemas de Informação Geográficas. 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. 283p.
- Pelizaro, C. (2000). *Avaliação do Desempenho do Algoritmo de um Programa Comercial para Roteirização de Veículos. São Carlos. Dissertação (Mestrado)*. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, 2000.