

CAPÍTULO 4

LOGÍSTICA COM SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E VISUALIZADORES WEB

Luiz Antonio Nogueira Lorena

RESUMO

Nos dias atuais, tornaram-se comuns tarefas de planejar roteiros e/ou decidir sobre locais de implantação de serviços. Essas tarefas tendem a se tornar rotineiras como, por exemplo, ver o boletim meteorológico de manhã antes de sair de casa. Com a disponibilização de serviços WEB baseados em localização, difundiu-se a importância da localização geográfica para divulgação de serviços, que podem apresentar caráter público (ambiental) ou comercial. Este texto visa mostrar algumas contribuições realizadas no LAC/INPE com o desenvolvimento de novos algoritmos para problemas de decisão usando dados espacialmente distribuídos, tais como os georeferenciados. Serão destacadas contribuições para os problemas de localização e roteamento de veículos, desenvolvidas em projetos temáticos de pesquisa com apoio da FAPESP e do projeto Universal CNPq.

4.1 Introdução

O desenvolvimento de sistemas computacionais com interfaces gráficas para processamento de dados geograficamente referenciados vem influenciando de maneira crescente diversas áreas de atividades como cartografia, mapeamento, planejamento urbano e regional, transportes, entre outras. Esta tecnologia torna possível a automatização de tarefas realizadas manualmente e facilita a realização de análises complexas, através da possibilidade de integração de dados de diversas fontes em bancos de dados geocodificados. Nos dias atuais tornaram-se comuns tarefas de planejar roteiros e/ou decidir sobre locais de implantação de serviços. Essas tarefas tendem a se tornar rotineiras como, por exemplo, ver o boletim meteorológico de manhã antes de sair de casa. Com a disponibilização de serviços WEB baseados em localização, tais como o Google Maps (<http://maps.google.com/>), difundiu-se a importância da localização geográfica para divulgação de serviços, que podem apresentar caráter público (ambiental) ou comercial.

Os provedores de serviços de localização georeferenciada oferecem a possibilidade de localizar pontos de interesse através de endereços das ruas e outras informações. Também oferecem a possibilidade de formar roteiros de caminhos mais curtos entre dois pontos, passando pelas ruas de uma área urbana ou através de estradas. Redes viárias são representadas através de linhas, normalmente formadas por segmentos de retas e intersecções. Dados e características dos objetos reais (normalmente ruas e avenidas) são associados a esses elementos geométricos como atributos, e também armazenados em bases de dados. Pontos de interesse como escolas, hospitais, ou quaisquer objetos localizados sobre a malha viária também são representados através de pontos e atributos a eles associados. Pontos e linhas que os interconectam são naturalmente representados por estruturas abstratas conhecidas como grafos e sobre as quais diversos problemas reais podem ser modelados e associados.

Os serviços de localização e determinação de roteiros podem envolver decisões sobre um número maior de pontos a serem localizados ou ainda um maior número de pontos nos roteiros. Estas aplicações podem ser classificadas como de localização de facilidades e roteamento de veículos. Na localização, destaca-se a localização de serviços públicos, tais como escolas, postos de saúde, ambulâncias, e outros. Os problemas de roteamento de veículos apresentam uma contribuição importante para distribuição/coleta de mercadorias e bens e/ou determinação de caminhos de menor custo para motoristas.

Este texto visa mostrar algumas contribuições realizadas no LAC/INPE com o desenvolvimento de novos algoritmos para problemas de decisão usando dados espacialmente distribuídos, tais como os georeferenciados. Serão destacadas contribuições para os problemas de localização e roteamento de veículos, desenvolvidas em projetos temáticos de pesquisa com apoio da FAPESP e do projeto Universal CNPq.

Os projetos “ARSIG – Análise de Redes com Sistemas de Informações Geográficas” e “ARSIG-2 – Sistemas de Apoio à Decisão Usando Redes e Sistemas de Informações Geográficas” foram coordenados no LAC/INPE durante o período 01/06/97 a 30/06/2002, em colaboração com a FEG/UNESP e o CNPTIA/Embrapa, como projetos temáticos FAPESP. Os projetos visaram a integração de ferramentas para análise de problemas de localização de facilidades e/ou roteamento de veículos a Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).

O projeto TerraNetwork (<http://www.lac.inpe.br/~TerraNetwork/>) vem sendo desenvolvido no LAC, com apoio do CNPq, visando integrar algoritmos de otimização em redes urbanas na biblioteca TerraLib (<http://www.terralib.org/>) desenvolvida no DPI/INPE.

Também em desenvolvimento encontra-se uma proposta de construir uma API (Application Programming Interface) denominada API Redes, para distribuição dos algoritmos desenvolvidos no TerraNetwork e de outros que vierem a ser desenvolvidos após o término do projeto. A API Redes está sendo desenvolvida em linguagem orientada a objetos com facilidades de integração a diversos SIGs (Sistemas de Informações Geográficas), inclusive os desenvolvidos no INPE (TerraPHP), os principais SIGs WEB comerciais e ainda o Google Earth e GoogleMaps.

4.2 Conceitos de Logística

A Logística trata de decisões sobre transporte, distribuição, armazenagem e manipulação de materiais, influenciando em diversas áreas da cadeia de produção de bens e de serviços, como a gestão, a manufatura e o marketing. O termo logística foi inicialmente usado no meio militar para descrever estratégias. Nos dias atuais o termo é utilizado para descrever processos presentes em áreas como cadeias de suprimentos, manufatura, transportes e armazenagem. Redes de Logística são utilizadas para modelar problemas de distribuição em empresas de transportes, de prestação de serviços, de entregas postais, de transportes públicos, entre outras, sendo utilizadas ferramentas computacionais de otimização e modelagem estocástica de processos para sua resolução.

Neste minicurso, estaremos interessados na Logística ligada a problemas que envolvem uma distribuição espacial dos dados, tais como nos problemas de localização (de postos de serviços, antenas, ambulâncias, depósitos, etc.) e nos relacionados a transportes, como distribuição de materiais, roteamento de veículos e transporte de carga e de passageiros.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são ferramentas adequadas e modernas para modelagem e tratamento de problemas com distribuição espacial de dados. Em geral os problemas de logística que serão estudados apresentam características que os tornam de difícil solução computacional, mas contam com algoritmos propostos no LAC/INPE, com contribuições originais publicadas em diversos meios de divulgação.

4.3 Grafos com Sistemas de Informações Geográficas

Inicialmente vamos recordar um conceito importante para a modelagem de problemas em grafos. Este é o conceito de caminho mínimo entre dois pontos do grafo. Um grafo pode ser definido como um par de conjuntos onde o primeiro representa os vértices e o segundo, pares de vértices (denominados arestas). Um grafo é geralmente representado por $G = (V, E)$, onde V é o conjunto dos vértices e E , o conjunto das arestas.

Por exemplo, no grafo ilustrado na Figura 4.1, os vértices podem representar centros de população e interseções de ruas ou avenidas em uma rede urbana, ou pontos de demanda e interseções de rodovias em um mapa de cidades. As arestas são usadas para representar ruas ou segmentos de rodovias. Uma avenida importante pode ser representada por várias arestas.

Podem existir vários caminhos entre pares de vértices que passem pelas arestas (soma dos valores que aparecem nas arestas). Entre os pontos A e C, está claro que o menor caminho tem valor igual a 1, mas torna-se difícil decidir o menor caminho entre B e J, devido ao grande número de opções. Existem vários algoritmos que podem ser usados para responder esta questão. Um dos mais antigos e fundamental é o conhecido como algoritmo de Dijkstra (Daskin, 1995; Drezner, 1995). Algoritmos mais rápidos existem e podem ser encontrados em vários livros de otimização em grafos.

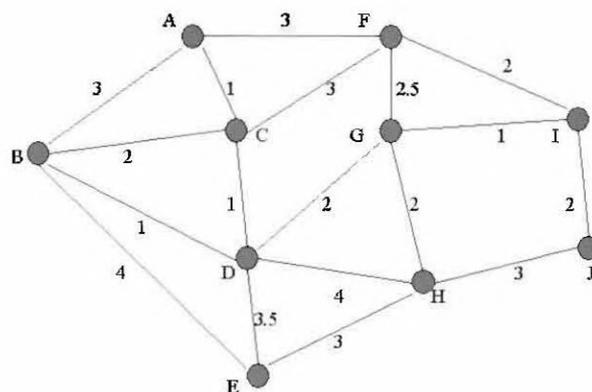


Figura 4.1 – Grafo representando rede urbana ou mapa de cidades.

Para alguns casos, desejamos encontrar a matriz de distâncias de caminhos mínimos entre cada vértice e todos os outros vértices do grafo. O algoritmo de Floyd constrói esta matriz, que passa a representar um grafo completo onde todos os vértices estão ligados por arestas.

Um outro problema interessante e básico considera o caso de um carteiro responsável pela entrega do correio em um determinado bairro de uma cidade. O carteiro deve sempre começar sua rota de entrega na posição onde a correspondência é armazenada, deve passar por cada rua em sua área e, eventualmente, retornar à origem. O problema que se levanta é encontrar a rota que minimiza a distância total que o carteiro percorre. Este problema é conhecido como o Problema do Carteiro Chinês (PCC), pode ser formulado para grafos direcionados (com direções nas arestas) e não direcionados, e é NP-Completo para grafos mistos (Larson e Odoni, 1981).

Um algoritmo para grafos não direcionados usa os conceitos relacionados ao trabalho de Euler. Um ciclo de Euler (ou euleriano) é um percurso que passa por cada aresta de um grafo exatamente uma vez, e começa e termina no mesmo vértice. Nos trabalhos de Euler, verifica-se que um grafo conexo possui um ciclo euleriano

se, e somente se, o grafo tem todos os vértices com grau par. O ciclo euleriano é uma solução do PCC sobre o grafo.

A Figura 4.2 mostra uma malha de ruas e o número de ordem dos segmentos de rua que formam a rota que percorre cada segmento com menor custo total.

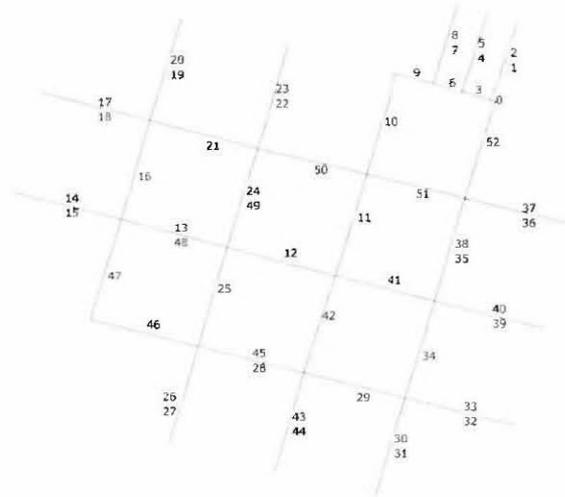


Figura 4.2 – Percurso do carteiro com Custo Mínimo.

Estes e outros algoritmos em grafos, que são eficientes do ponto de vista computacional (tempo de execução limitado por uma função polinomial nos dados de entrada do problema), como, por exemplo, o de encontrar uma árvore geradora de peso mínimo, podem ser consultados nos livros (Daskin, 1995; Drezner, 1995), e, portanto não serão descritos neste texto. Para os problemas de localização e roteamento que serão descritos a seguir, tais algoritmos não apresentam eficiência. Quanto maior o problema (entrada de dados), exponencialmente maior pode se tornar o tempo para resolvê-lo. Mais adiante, sugeriremos uma heurística simples para uma classe de problemas de localização que podem ser considerados problemas de *clustering*.

4.4 Modelos para localização/alocação de facilidades

Problemas de localização tratam de decisões sobre onde localizar facilidades, considerando clientes que devem ser servidos, de forma a otimizar um certo critério. O termo “facilidades” pode ser substituído por fábricas, depósitos, escolas, etc., enquanto que “clientes” se refere a depósitos, unidades de vendas, estudantes, etc. Em geral, os vários centros selecionados que podem ser localizados também podem ser alocados ao subconjunto de centros que serão abertos. Por isso também são conhecidos como problemas de localização-alocação, devido ao processo de alocação dos outros centros aos centros abertos (Lorena, Senne, Paiva e Pereira, 2001).

Esta é uma área que tem despertado crescente interesse em planejadores, principalmente quando uma base de dados geograficamente referenciada pode ser usada. Professores e pesquisadores formaram dois principais grupos de pesquisa e divulgação. O grupo europeu EURO Working Group on Locational Analysis (<http://www.vub.ac.be/EWGLA/homepage.htm>) e o Section on Location Analysis – SOLA (<http://location.section.informs.org/>), uma sessão do INFORMS, promovem reuniões anuais, na forma de congressos, onde são discutidas aplicações e desenvolvimentos relacionados a problemas de localização.

As aplicações são, em geral, divididas para setores públicos e privados. No caso de setores públicos, aplicações maximizam a satisfação dos clientes em detrimento dos custos necessários para o alcance de tal objetivo (em geral os custos não são estimados com exatidão). Entre os exemplos de aplicações em setores públicos estão a localização de escolas, postos de saúde, corpo de bombeiros, ambulâncias, viaturas de polícia, pontos de ônibus, entre outros. No caso do setor privado, custos chamados fixos são encontrados, e suas aplicações envolvem em geral fábricas, depósitos, torres de transmissão, lojas de franquias, etc.

4.4.1 Localização de Medianas

Vários problemas de localização referem-se a medianas. A busca de p -medianas em uma rede é um problema clássico de localização (Lorena e Senne, 1999). O objetivo é localizar p facilidades ou recursos (medianas), de forma a minimizar a soma das distâncias de cada vértice à sua facilidade (ou algum recurso) mais próxima. Na rede, os arcos seriam as rodovias ou a malha viária, e os nós, locais onde as facilidades (escolas, silos, etc.) podem ser localizadas.

O problema das p -medianas pode ser formulado como um problema de programação inteira binária. Consideremos um grafo completo para uma dada instância, obtido através da aplicação do algoritmo de Floyd, e o conjunto de vértices indexados resultantes $\{1, \dots, n\}$. Tem-se, então, definidas as distâncias entre pares de vértices $d_{ij}; i, j = 1, \dots, n$.

O problema pode ser descrito matematicamente como segue:

a) p -medianas:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ii} = p$$

$$x_{ij} \leq x_{ii}, i, j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, i, j = 1, \dots, n$$

Onde: a variável $x_{ij} = 1$ indica que um vértice j é alocado a um vértice i ; cada vértice j é alocado a somente um vértice i , que deve ser uma mediana; e o número exato de medianas a ser localizado deve ser p .

Algumas suposições são consideradas para a validade deste modelo, tais como:

- toda a demanda de um vértice é atendida por um único centro (mediana);
- todo ponto de demanda deve ser servido pelo centro mais próximo;

- os vértices coincidem com os pontos de demanda;
- não existem restrições de capacidade nos vértices;
- os custos fixos de implementação não são considerados.

Estas suposições podem não valer em diversas situações, como, por exemplo, se o cliente fizer compras em três lojas diferentes (violando a suposição 1), ou não abastecer em um posto de gasolina que está em frente a sua residência para abastecer naquele que se encontra no caminho do trabalho (violando a suposição 2), ou deixar de visitar algum centro de venda por estar situado muito longe de casa (violando a suposição 3).

Na localização de novas fábricas, o modelo de p-medianas é um modelo de alto nível, que somente proporciona uma idéia de em qual centro populacional as fábricas podem ser localizadas. A localização mais precisa deve ser acompanhada de um estudo aprofundado dos locais da cidade, baseado em zoneamento, custo da terra, rodovias, etc. Do mesmo modo, no caso urbano, (por exemplo, na localização de escolas), vários outros fatores devem ser considerados, como acessibilidade, disponibilidade do terreno, etc.

O modelo de p-medianas é um dos modelos de localização mais populares da literatura. Foi aplicado várias vezes para localizar centros no setores públicos e privados. Conceitualmente, ele é muito simples, entretanto possui um número muito grande de soluções, e não é sempre possível resolvê-lo de forma ótima. Na seção 7 será apresentada uma heurística simples e eficiente para aproximar (com qualidade) a solução ótima deste problema.

A Figura 4.3 mostra a localização de 3 medianas utilizando dados do centro da cidade de São José dos Campos (disponíveis em <http://www.lac.inpe.br/~lorena/instancias.html>). Os polígonos de fundo correspondem às quadras do centro da cidade. Os pontos sobrepostos são os nós de demanda considerados.



Figura 4.3 – Localização de 3 medianas – distâncias euclidianas.

Alguns modelos de localização assumem a existência de restrições sobre a capacidade de atendimento dos centros. Nesse tipo de problema, considera-se que cada cliente possui associada uma demanda a ser satisfeita pelo centro escolhido para atendê-lo. A soma das demandas de todos os clientes atendidos por um centro não deve superar a capacidade de atendimento do mesmo. Quando esse tipo de condicionante está presente, dizemos tratar-se de um Problema de Localização de Facilidades Capacitado. O Problema de Localização de Facilidades Capacitado (PLFC) consiste em decidir em quais locais devem ser instaladas facilidades, a partir de

um conjunto de locais potenciais. Deve-se considerar que existe uma demanda de clientes a serem atendidos por estas facilidades e que cada facilidade não pode se comprometer a suprir mais que sua capacidade de produção, fornecimento, armazenamento ou atendimento. O objetivo é determinar os locais de atribuição de modo que sejam atendidos todos os clientes e minimizados os custos fixos de operação e de transporte.

Na versão capacitada do problema de p-medianas, substituem-se no modelo indicado em 'a)' as restrições

$$x_{ij} \leq x_{ii}, i, j = 1, \dots, n \quad \text{por:} \quad \sum_{j=1}^n f_j x_{ij} \leq b_i x_{ii}, i = 1, \dots, n, \text{ onde:}$$

- f_j é a demanda do nó j ;
- b_i é a capacidade de atendimento do nó i , se este for escolhido como centro (mediana).

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram as soluções de um problema contendo 31 vértices, dos quais foram selecionados 3 para a instalação de facilidades. No primeiro caso consideraram-se distâncias lineares e, no segundo, foram utilizadas distâncias calculadas sobre a rede que representa um subconjunto das ruas que compõem o centro da cidade de São José dos Campos. Como se pode observar, existem diferenças entre as soluções dos dois estudos.

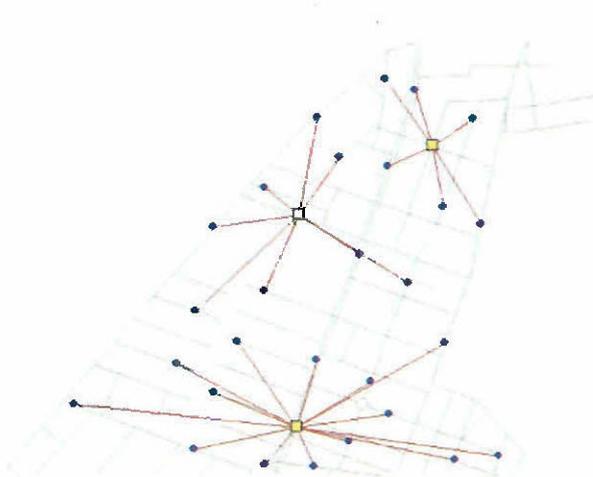


Figura 4.4 – Localização de 3 medianas – caso capacitado – distâncias euclidianas.

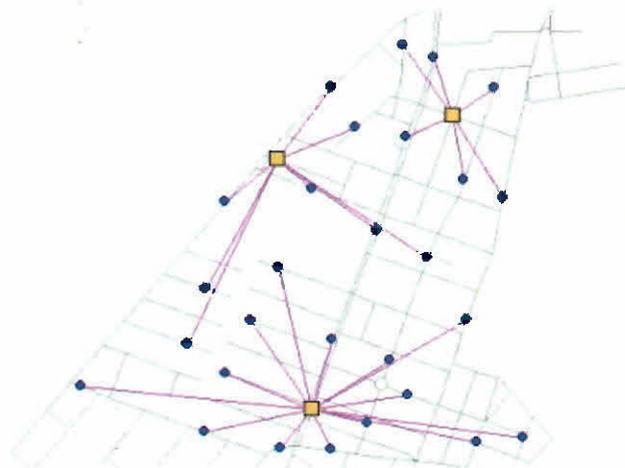


Figura 4.5 – Localização de 3 medianas – caso capacitado – distâncias de rede.

4.4.2 Localização com Coberturas

Na sua forma mais geral, o problema de localização de facilidades consiste na escolha de locais para instalar um certo número de facilidades (servidores) que atendam a um conjunto de clientes (pontos de demanda) distribuídos em um espaço geográfico, e determinar a alocação dos clientes entre as facilidades. Um exemplo conhecido na literatura é o problema de cobertura (Pereira, Lorena e Senne, 2007).

Vamos considerar o seguinte exemplo para melhor explicar os conceitos e problemas envolvidos. Suponha que uma prefeitura deseje localizar ambulâncias para o atendimento emergencial de pessoas acidentadas, levando-se em conta um tempo máximo de atendimento.

Na formulação do problema, existem muitos objetivos que podem ser considerados, e estes, muitas vezes, são conflitantes. Para o município, o controle dos custos operacionais e de capital é de suma importância, porém, é também importante responder a um grande percentual de chamadas dentro de um limite aceitável de tempo. A resposta a chamadas aumentará com um maior número de estações abertas, mas, obviamente, sua implementação será mais cara.

Pode-se ter:

a) Objetivo: Minimizar o número de estações de ambulâncias abertas.

Sujeito a: Cobrir em determinado tempo de resposta todas as partes da cidade.

b) Objetivo: Maximizar a demanda que pode ser coberta em determinado tempo de resposta.

Sujeito a: Abrir um número especificado de estações.

Algumas questões devem ser respondidas. Como medir a cobertura e como modelar matematicamente?

Inicialmente a população é agregada em zonas. Uma zona pode consistir de uma quadra ou quarteirão, ou de conjuntos de quarteirões. A seguir, devem ser levantados os dados listados abaixo.

- As posições candidatas para localização das estações:

As posições candidatas são determinadas pela municipalidade em um estudo prévio. Vários critérios são usados, tais como: proximidade de grandes artérias, de estações de bombeiros que possam abrigar ambulâncias, propriedade da terra, zoneamento, etc.

- A demanda de cada zona:

Pode ser estimada por dados históricos de chamadas de cada zona, pela população da zona, ou por outra medida que substitua a demanda. Assume-se que a população está concentrada no centro da zona (zonas pequenas)

- O tempo de resposta entre estações de ambulâncias e zonas:

Na avaliação de locais para localização de estações, os tempos de resposta da estação para várias partes da cidade deve ser calculado. O tempo do trajeto entre cada local e as zonas deve ser estimado antes do modelo ser implementado.

Um algoritmo de caminho mínimo entre todos os pontos da rede pode fornecer subsídios para a estimativa deste tempo, levando em conta que o trajeto da ambulância em alguns períodos do dia pode ser dificultado (por exemplo, na saída de empregados do trabalho no final do dia).

Supondo n pontos possíveis de localização de ambulâncias, m pontos de demanda, as distâncias entre pontos d_{ij} , as demandas dos pontos f_i , e a distância crítica de atendimento d , então os modelos resultantes podem ser formulados matematicamente por:

b) Cobertura de conjuntos

$$\text{Min } \sum_{j=1}^n x_j$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1, \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, n$$

$$\text{onde } a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } d_{ij} \leq d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

c) *Máxima Cobertura [5]*

$$\text{Max} \sum_{i=1}^m f_i y_i$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i, i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = p$$

$$x_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, n$$

$$y_i \in \{0,1\}, i = 1, \dots, m$$

onde $N_i = \{j \mid d_{ij} \leq d\}$ é o conjunto de facilidades que estão abaixo de uma distância crítica d do ponto de demanda i .

A Figura 4.6 mostra a aplicação de uma heurística de localização-alocação (descrita na Seção 7) ao problema de máxima cobertura, onde estão sendo considerados os dados georeferenciados da região central de São José dos Campos (disponíveis em <http://www.lac.inpe.br/~lorena/instancias.html>). Um tema de pontos foi extraído (um ponto por quadra) com as respectivas demandas calculadas com base no cadastro de imóveis existente nas quadras. A demanda será maior conforme aumenta o número de imóveis nas quadras. Quadras vazias receberam a demanda unitária. A solução apresenta a localização de 3 antenas transmissoras para distribuição de serviço de internet via rádio, com raio de ação de 800 metros (o alcance das antenas não leva em conta as cotas dos terrenos e os obstáculos que estariam no raio de ação).

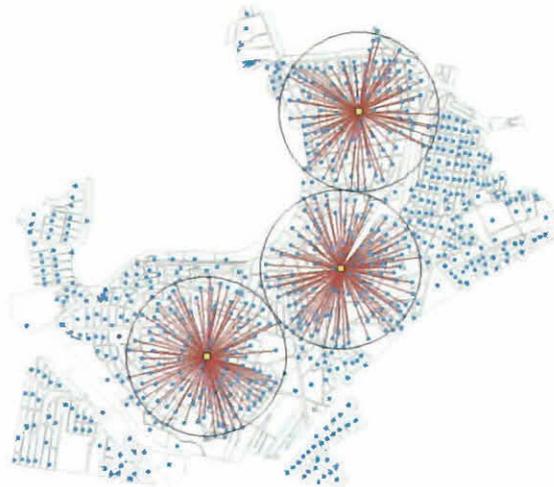


Figura 4.6 – Solução de máxima cobertura para 3 antenas.

A mesma situação poderia se referir à localização de ambulâncias. Neste caso as distâncias (entre pontos e a crítica) deveriam levar em conta o deslocamento sobre um tema de linhas e pontos (rede).

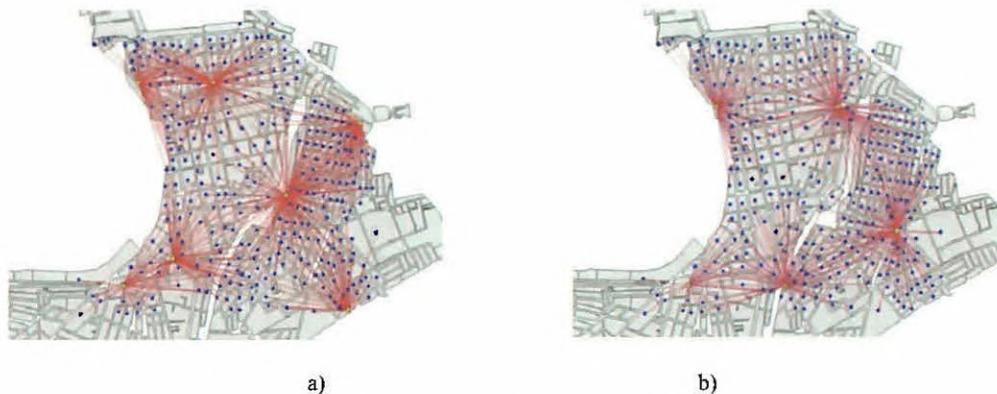


Figura 4.7 – Soluções do problema de cobertura de conjuntos.

A Figura 4.7 mostra duas soluções possíveis para o problema de cobertura de conjuntos. Neste caso procura-se minimizar o número de centros abertos, mantendo a cobertura da totalidade dos pontos de demanda. Portanto, a solução representada na Figura 4.7b é melhor que a representada na Figura 4.7a.

4.4.3 Localização/alocação com congestionamento

Em muitos trabalhos envolvendo problemas de localização, a distância (ou tempo) entre os pontos de demanda e a facilidade à qual eles estão sendo alocados é o fator que representa a qualidade dos serviços prestados a usuários. Entretanto, quando se projeta uma rede de serviços, como sistemas de saúde, bancários ou de vendas de bilhetes distribuídos, a localização dos centros tem uma forte influência no congestionamento de cada um, e, conseqüentemente, a qualidade de serviços deve ser mais bem modelada e não considerar apenas a distância ou o tempo de deslocamento.

Assim, deve-se cuidar para que sua localização permita aos usuários chegarem ao centro em um tempo aceitável e que o tempo de espera para atendimento seja o menor possível ou que a quantidade de pessoas na fila seja mínima, uma vez que esses são parâmetros importantes na medida da qualidade desejada (Correa, Chaves e Lorena, 2007).

O congestionamento ocorre quando um centro não é capaz de atender, simultaneamente, a todas as solicitações de serviços que lhe são feitas. Normalmente, os modelos tradicionais que tratam desse problema adicionam uma restrição de capacidade que força a demanda por serviço, normalmente constante no tempo e igual a uma média, que deve ser menor do que a máxima capacidade do centro. Essa abordagem não considera a natureza dinâmica do congestionamento e trata o problema de forma determinística. Isso faz com que o modelo, dependendo de como a restrição seja obtida, tenha servidores ociosos ou não tenha a capacidade de atender a todas as demandas.

Marianov e Serra (1998) propuseram modelos baseados no fato de que o número de solicitações de serviços não é constante no tempo, mas um processo estocástico, cuja estocasticidade de demanda é explicitamente

considerada no trato das restrições de capacidade, para as quais, ao invés um limite máximo, os autores definem um limite mínimo para a qualidade dos seus serviços. Essa qualidade é refletida nos itens de tempo de espera ou quantidade de pessoas que aguardam por um atendimento.

Os modelos propostos por esses pesquisadores tratam de localizar uma certa quantidade de postos de saúde, com um ou vários servidores, de modo que a população dentro de uma distância padrão do centro seja servida adequadamente, isto é, que ninguém fique na fila por um período maior que um dado tempo limite nem encontre um número de outros clientes acima do previsto, com uma probabilidade definida a priori. Foram considerados os sistemas de fila $M/M/1$ e $M/M/m$, em que a taxa de chegada ao centro j segue a distribuição de Poisson com taxa λ_j , e o tempo de serviço no centro j é exponencialmente distribuído com taxa μ_j , para, respectivamente, um ou vários servidores.

O modelo de localização-alocação de máxima cobertura que considera congestionamentos é denominado “modelo de filas para localização-alocação de máxima cobertura” por (Marianov e Serra,1998) e pode ser definido como:

- “Localizar p centros e alocar usuários de forma a maximizar a população coberta, onde a cobertura é definida como: a população coberta é alocada a um centro dentro de um tempo ou distância padrão de sua residência (ponto de demanda) e, se um usuário é coberto, na sua chegada ao centro, ele vai esperar em uma fila com no máximo b outras pessoas ou será atendido no tempo τ , com probabilidade, no mínimo, α_f ”.

A modelagem matemática pode ser escrita como um problema do tipo p -medianas capacitado modificado para comportar as variáveis de localização e alocação, tendo como objetivo maximizar a população coberta, considerando uma determinada quantidade de centros de atendimento. As alocações são representadas pelas variáveis binárias x_{ij} , tal que $i \in I$ e $j \in N_i$, onde I é o conjunto dos pontos de demanda a serem alocados e N_i é o conjunto de localizações candidatas que estão dentro de uma distância padrão em relação ao i . $[x_{ij}]$ é a matriz de alocações, com $x_{ij} = 1$, se o ponto de demanda i for alocado ao centro j , $x_{ij} = 0$, caso contrário. As localizações são representadas pelas variáveis binárias y_j , com $y_j = 1$, se o centro j for selecionado, $y_j = 0$, caso contrário. O parâmetro a_i define a população total no ponto de demanda i . Todo ponto de demanda é um potencial centro de atendimento.

d) *Localização com congestionamento*

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } \sum_{i,j} a_i x_{ij} \\
 \text{Sujeito a} & \quad x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \\
 & \quad \sum_{j \in N_i} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \\
 \text{(para a quantidade de pessoas na fila)} & \quad \sum_{i \in I} f_i x_{ij} \leq \mu_j \sqrt[b+2]{1-\alpha_f} \quad \forall j, \quad \text{ou} \\
 \text{(para o tempo de espera)} & \quad \sum_{i \in I} f_i x_{ij} \leq \mu_j + \frac{1}{\tau} \ln(1-\alpha_f) \quad \forall j, \\
 & \quad \sum_i y_i = p \\
 & \quad y_j, x_{ij} \in \{0,1\}, \quad j \in N_i \quad \forall i, j
 \end{aligned}$$

A função objetivo maximiza a população alocada a um centro. As restrições definem que p centros devem ser abertos; que somente é possível alocar um ponto de demanda i a um centro j se houver um centro em j ; e que cada ponto de demanda seja alocado a, no máximo, um centro. As restrições $\sum_{i \in I} f_i x_{ij} \leq \mu_j \sqrt[b+2]{1-\alpha_f}$ forçam para que cada centro tenha no máximo b pessoas na fila, com probabilidade igual a, no mínimo, α_f , enquanto as restrições $\sum_{i \in I} f_i x_{ij} \leq \mu_j + \frac{1}{\tau} \ln(1-\alpha_f)$ determinam que o tempo gasto no centro j seja igual a, no máximo, τ , com a probabilidade de, no mínimo, α_f .

4.4.4 Outros modelos de Localização

Vários outros modelos de localização podem ser encontrados na literatura. Entre eles, destacam-se:

- os modelos de competição: o produto que será distribuído nos locais a serem localizados já contam com produtos similares, distribuídos por concorrentes. Neste caso, deseja-se entrar no mercado capturando a maior quantidade possível de demanda, considerando as instalações dos concorrentes;
- os modelos probabilísticos: o recurso localizado pode não estar disponível quando necessário; por exemplo, a ambulância localizada pode estar atendendo um outro chamado quando necessária em mais de um local ao mesmo tempo. Neste caso considera-se a possibilidade de uma ocorrência deste tipo de

evento incluindo no modelo medidas de probabilidades. Também é possível considerarem-se filas de atendimento, etc.

- modelos que combinam localização e roteamento: deseja-se localizar e, ao mesmo tempo, sequenciar uma série de tarefas.
- modelos para materiais perigosos: localizar, por exemplo, resíduos tóxicos. Neste caso, deseja-se uma grande distância de aglomerados populacionais.

4.5 Modelos para roteirização de veículos

Problemas de distribuição aparecem em uma série de serviços, como entrega bancária, entrega postal, entrega de mercadorias, rotas de ônibus escolar, coleta de lixo industrial, serviço de entrega noturnas, operações de frete, e outros. Sua solução pode diminuir bastante o custo de distribuição, causando uma grande economia tanto para a indústria como para o governo. No entanto, muitos desses problemas são difíceis de resolver. Esses dois atrativos fazem com que existam muitos trabalhos disponíveis na literatura sobre tais problemas, conhecidos como problemas de roteamento e planejamento (*scheduling*).

No problema clássico de roteamento de veículos, consideram-se m clientes espacialmente distribuídos, cada um com uma demanda de mercadorias. As mercadorias são entregues a partir de um depósito por uma frota de veículos homogêneos. Cada veículo realiza um percurso saindo do depósito e entregando as mercadorias para um subconjunto de clientes, satisfazendo as necessidades de demanda de cada um e retornando ao depósito. A rota de cada veículo deve obedecer a algumas restrições, como: a quantidade de mercadoria entregue não deve exceder a capacidade do veículo e o tempo limite para realizar uma rota não deve ser ultrapassado. O problema de roteamento de veículos pretende traçar rotas para os veículos, determinando a quais clientes deve-se fornecer a mercadoria, de forma a não violar as restrições e otimizar alguma função objetivo.

Normalmente são consideradas três funções objetivo (Laporte, 2007):

- Minimizar a distância total percorrida (ou tempo gasto) por todos os veículos;
- Minimizar o número de veículos e, dentro deste número mínimo, minimizar a distância total percorrida;
- Minimizar a combinação entre custo de veículos e distância percorrida.

Uma possibilidade frequentemente explorada nas aplicações é estabelecer *clusters*, que satisfaçam as restrições de capacidades dos veículos, e então sequenciar de forma ótima o roteiro de entregas dos caminhões dentro dos *clusters*. Pode-se resolver um problema de p -medianas capacitado para determinação dos *clusters*, e então aplicar um algoritmo para solução dos problemas de caixeiro viajante resultantes dentro dos *clusters*. Veja a Figura 4.8 para uma solução de rotas para 3 caminhões, aproveitando a solução apresentada na Figura 4.5 para o problema de p -medianas capacitado. Pode-se interpretar que o depósito está situado fora dos *clusters* e os caminhões devem percorrer um trajeto inicial para entrar nas rotas dos *clusters*.

Existem muitas variações do problema clássico, que podem ser consultados em (Laporte, 2007).

Uma formulação matemática usual, eficiente e muito explorada é a de geração de colunas, onde o problema é formulado como um problema de cobertura/particionamento de conjuntos, com um grande número de colunas (geralmente desconhecidas) que representam as rotas ou a programação de atividades (horários) (Pereira, Lorena e Senne, 2007; Senne, Lorena e Pereira, 2005). Esse modelo foi aplicado com sucesso a problemas de roteamento com janelas de tempo, isto é, períodos determinados em que o produto deve ser entregue, e ainda com outras restrições que seriam difíceis de serem modeladas com outros tipos de formulações.

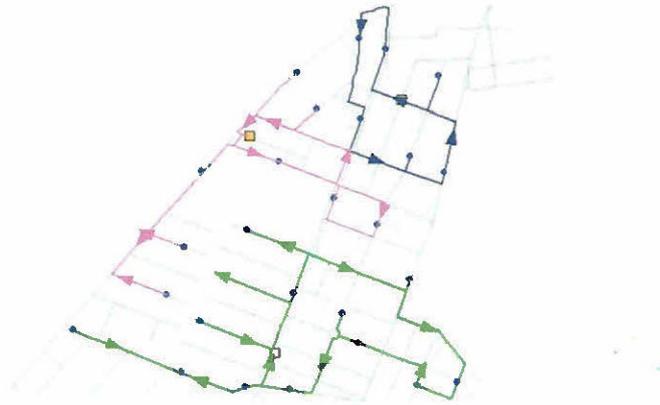


Figura 4.8 – Rotas para 3 caminhões (considerando capacidades).

Vale a pena citar que o modelo de cobertura ‘a’, formulado para localização, é similar ao de roteamento, com uma nova interpretação para as componentes da matriz de cobertura. Neste caso tem-se:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a rota passa pelo nó } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A função objetivo deve levar em conta os custos das rotas (identificados, por exemplo, por C_j), e tem-se a formulação:

e) Roteamento com geração de colunas

$$\text{Min } \sum_{j=1}^{nc} C_j x_j$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j=1}^{nc} a_{ij} x_j = 1, \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, nc;$$

onde nc é o número de colunas, que é em geral muito grande.

Problema de roteirização de veículos com janelas de tempo

Sejam V o conjunto de veículos (idênticos) e $C = \{1, \dots, n\}$ o conjunto de clientes a serem atendidos, interligados a um depósito por um grafo direcionado. Usando os multiplicadores duais $\lambda_i, i \in C$, obtidos resolvendo-se o modelo ‘e’) como relaxação de programação linear para um subconjunto de colunas, as novas colunas do problema serão geradas resolvendo-se os seguintes subproblemas ($k \in V$) de caminho mínimo com restrições de tempo e capacidade:

$$z_{SP}^k(\lambda)_t = \min \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \hat{c}_{ij} \cdot y_{ijk}$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a:} \quad & \sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in N} y_{ijk} \leq q, & \forall k \in V \\ & \sum_{j \in N} y_{0jk} = 1, & \forall k \in V \\ & \sum_{i \in N} y_{ihk} - \sum_{j \in N} y_{hjk} = 0, & \forall h \in C, \forall k \in V \\ & \sum_{i \in N} y_{i,n+1,k} = 1, & \forall k \in V \\ & s_{ik} + t_{ij} - M(1 - y_{ijk}) \leq s_{jk}, & \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in V \\ & a_i \leq s_{ik} \leq b_i, & \forall i \in N, \forall k \in V \\ & y_{ijk} \in \{0, 1\}, & \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in V \end{aligned}$$

As restrições impõem que: a demanda total dos clientes atendidos por cada veículo não deve exceder sua capacidade; cada veículo deve deixar o depósito uma única vez; cada cliente visitado é deixado; e todos os veículos devem retornar ao depósito apenas uma vez. Restrições de precedência determinam que um veículo, partindo do cliente i , não deve chegar ao cliente j antes do instante $s_{ik} + t_{ij}$, onde M é um valor arbitrariamente grande. Outras restrições garantem que o início do atendimento de cada cliente seja executado dentro do intervalo especificado pela sua janela de tempo.

4.6 Projetos ARSIG e TerraNetwork

4.6.1 Projetos ARSIG

Levando-se em conta a capacidade de armazenar, exibir e manipular dados espacialmente distribuídos, a integração de algoritmos de localização aos SIGs foi iniciada há vários anos. A ESRI integrou alguns problemas não-capacitados de localização a seu Sistema de Informações Geográficas ArcInfo [11]. Com o desenvolvimento de dois projetos temáticos apoiados pela FAPESP, foi iniciada a integração de algoritmos de localização e roteamento aos SIGs ArcView e SPRING (desenvolvido pelo INPE). Os algoritmos, baseados em pesquisa recente publicada em revistas internacionais especializadas, estão disponíveis na página do projeto (<http://www.lac.inpe.br/~lorena/ArsigIndex.html>) em forma de códigos integrados aos SIGs.

Os projetos ARSIG e ARSIG2 beneficiaram-se de uma técnica proposta por (Hillsman, 1984), que usa edição na formulação do problema das p -medianas e consegue, de forma aproximada, tratar outros tipos de problemas de localização usando o modelo de p -medianas. Esta é uma idéia interessante para a integração de algoritmos de localização a Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), pois em princípio bastaria ter-se um bom código para solução do problema de p -medianas.

Entre os modelos possíveis estão:

- p-medianas com restrição de distância máxima: encontra a configuração que minimiza a distância total (com pesos) percorrida de cada ponto de demanda a seu centro aberto mais próximo, enquanto assegura que o máximo de pontos possível está dentro de uma dada distância de seu centro mais próximo.
- Maximização de atendimento: encontra a configuração que maximiza o atendimento (maximiza o número de pontos de demanda servidos), assumindo que o desejo de atribuição de demanda a centros é linearmente proporcional à distância do centro.
- Minimização da distância total em potências: encontra a configuração que minimiza a distância total percorrida de cada ponto de demanda a seu centro aberto mais próximo, considerando distâncias individuais elevadas ao quadrado, ao cubo, ou alguma outra função de potência.
- Problema de Máxima Cobertura com restrição de distância máxima: encontra a configuração que maximiza o número de pontos de demanda que se encontram a uma dada distância de seu centro mais próximo. Uma restrição secundária de maior distância é aplicada para assegurar que pontos que não estão abaixo da primeira distância serão servidos se estiverem abaixo da segunda distância.

No ARSIG, a integração do algoritmo de p-medianas ao Arcview foi feita através de *scripts* escritos em *Avenue*. O *script*, o programa executável e um guia de uso estão disponíveis via Internet na página do projeto (<http://www.lac.inpe.br/~lorena/ArsigIndex.html>). As distâncias consideradas podem levar em conta a rede urbana ou distâncias Euclidianas. Foi feita também a integração deste algoritmo ao sistema SPRING, um SIG completo desenvolvido no INPE. Na versão atual, as distâncias podem ser Euclidianas ou considerar características da rede urbana. Também alguns algoritmos relacionados a transportes e roteamento foram implementados – basicamente, os algoritmos de Dijkstra e Floyd, para calcular caminhos mínimos em um grafo (Figura 4.9).

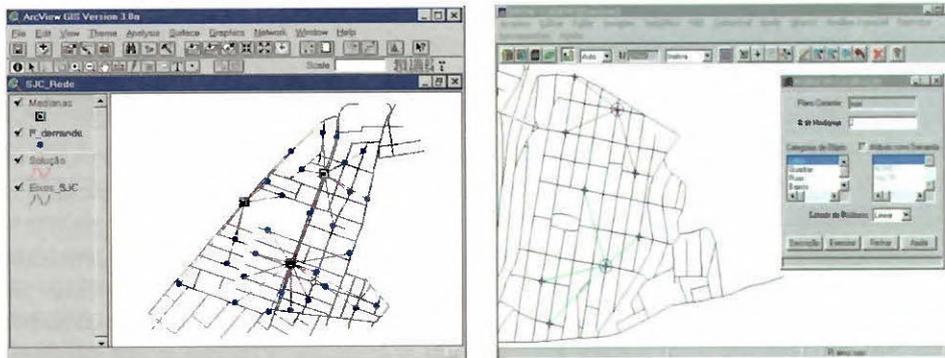


Figura 4.9 – Integrações ao ArcView e SPRING – projeto ARSIG.

No ARSIG2 foram feitas as seguintes integrações ao ArcView:

- Problema de p-medianas capacitado,
- Problema de p-medianas com restrição de distância máxima,
- Problema de localização de máxima cobertura e

- Problema de localização com competição.

O problema de p-medianas capacitado foi também integrado ao SPRING (Figura 4.10).

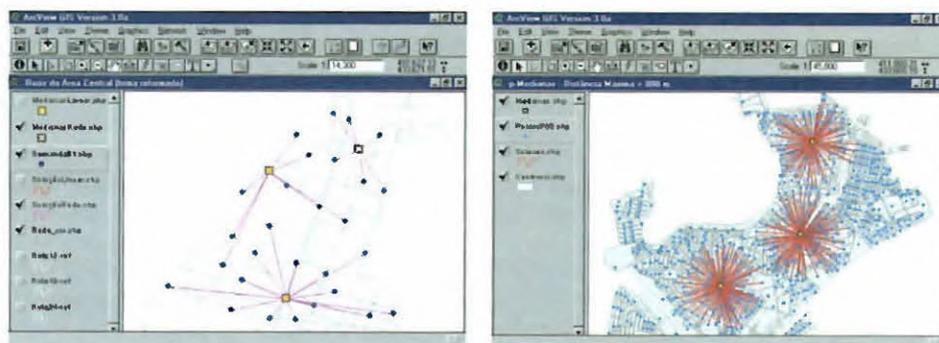


Figura 4.10 – Integrações ao ArcView – projeto ARSIG2.

4.6.2 Projeto TerraNetwork

O objetivo original do TerraNetwork foi o desenvolvimento de um protótipo de sistema para tratamento de problemas relativos a redes usando SIG; como suporte, optou-se pelo uso de um modelo de banco de dados geográficos e uma biblioteca de rotinas para sua manipulação chamada TerraLib (<http://www.terralib.org>), livremente disponível, e desenvolvida no INPE. Para visualização dos resultados, também armazenados no banco de dados, foi utilizada uma ferramenta desenvolvida também no INPE e disponível livremente chamada TerraView (<http://www.dpi.inpe.br/terraview/index.php>). Como as redes são modeladas como grafos, foi utilizada uma biblioteca de rotinas para tratamento de problemas sobre grafos conhecida como Boost Graph Library (BGL), também disponível livremente (<http://www.boost.org>).

Para implementar funcionalidades para tratamento de diversos problemas sobre redes, foi proposto um modelo simples de classes que permitem a representação de um grafo criado a partir de uma malha viária e de pontos de interesse, e a implementação de funcionalidades através de métodos dessas classes. A linguagem escolhida, para maior adequação ao software de suporte, foi C++, e o ambiente de desenvolvimento utilizado foi o Microsoft Visual C++.

O modelo é composto por uma classe principal chamada Net, que possui métodos que permitem a criação de um grafo a partir de uma camada de dados geográficos com ruas e suas intersecções. As ruas se tornam arestas e as intersecções, os vértices do grafo. A classe Net passa a ter então uma referência a um objeto de uma classe chamada NetGraph, que representa o grafo. Essa referência pode ser obtida também através da leitura dos dados de um grafo já criado anteriormente e armazenado no próprio banco. A classe Net também possui um método de nome mergePoints, que permite a inserção de pontos de interesse como novos vértices do grafo, a partir de uma camada de dados geográficos armazenada no banco. Objetos da classe NetGraph, por sua vez, possuem coleções de referências a objetos das classes chamadas Edge e Vertex, que representam as arestas e os vértices do grafo. Cada objeto dessas duas classes possui uma coleção de referências à classe Attribute, superclasse de três outras classes, cada uma representando um atributo de um determinado tipo de dados, chamadas DoubleAttribute, IntAttribute e StringAttribute.

Uma das tarefas mais comuns executadas com SIGs é a determinação do caminho de custo mínimo entre dois vértices de uma rede. Na classe Net foi implementado um método chamado `minimumPath`, que executa essa tarefa. Esse método aciona uma rotina de BGL que executa o clássico algoritmo de Dijkstra.

Uma outra aplicação dos SIG pode requerer a determinação do caminho de custo mínimo entre diversos pontos de interesse na rede, de modo que cada ponto seja visitado uma única vez. Este problema é equivalente ao clássico Problema do Caixeiro Viajante (PCV) (Larson e Odoni, 1981), cujo objetivo é encontrar o trajeto de custo mínimo, partindo de um ponto de origem, para visitar exatamente uma vez cada um dos outros pontos de interesse, e retornar à origem. Este problema é uma abstração de diversas aplicações em transporte e logística, como, por exemplo, a determinação de rotas de ônibus escolares, rotas para serviços de entregas de produtos, rotas para oferecer transporte a pessoas com necessidades especiais, etc. A Figura 4.11 mostra saídas dos algoritmos de caminhos no TerraView.

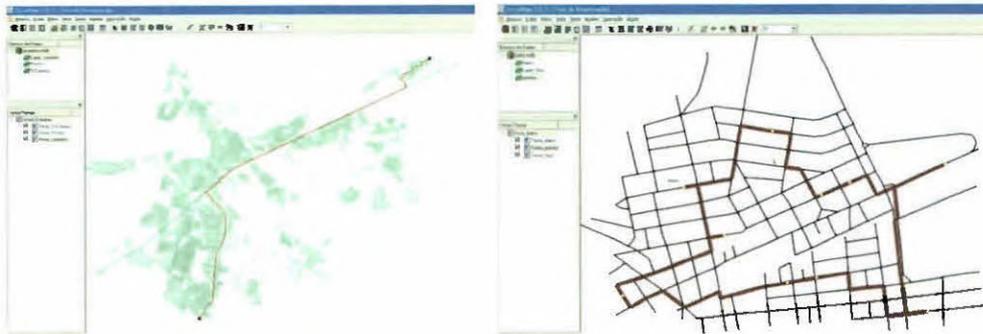


Figura 4.11 – Caminho mínimo e caixeiro viajante no TerraView – projeto TerraNetwork.

Dois aplicações imediatas dos caminhos de custo mínimo são também implementadas como métodos da classe Net: encontrar a facilidade mais próxima a uma posição em uma rede, e determinar uma área de serviço em torno de uma posição.

O termo “facilidade mais próxima” se refere a um fornecedor de um determinado tipo do serviço que está mais próximo de uma dada localização. Na classe Net foi criado um método chamado `nearestPoint`, que recebe parâmetros de entrada para identificar o ponto destino (cliente do serviço) e o atributo de custo das arestas. Como o ponto destino, os pontos fornecedores foram previamente inseridos como vértices do grafo. A rotina funciona simplesmente com a execução da rotina de Dijkstra para selecionar o fornecedor mais próximo do ponto destino.

Na classe Net foi criado um método chamado `serviceArea`, que pode ser usado para encontrar pontos de interesse que estão dentro da área de vizinhança em torno de um dado ponto, definida por uma distância ou tempo limite de percurso, isto é, um custo máximo.

O método usa também o algoritmo de Dijkstra para determinar os pontos que estão dentro do limite, e gera uma representação geométrica desta região. A rotina usa as facilidades da biblioteca TerraLib para criar um polígono preenchido com uma cor transparente, que permite visualmente observar quais pontos de interesse estão dentro da região.

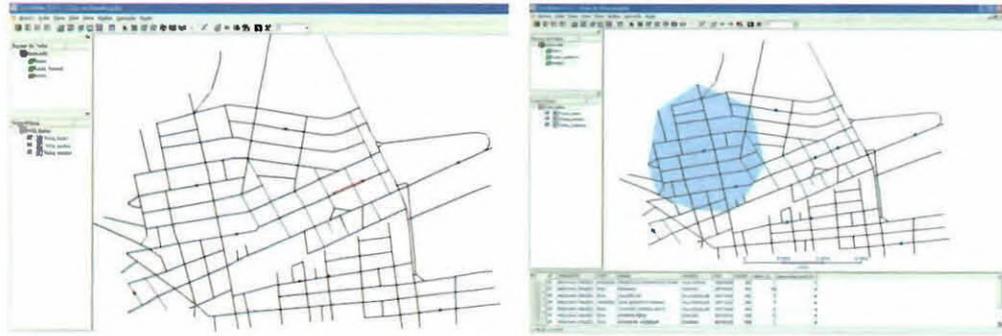


Figura 4.12 – Facilidade mais próxima e área de serviço no TerraView – projeto TerraNetwork.

Outra funcionalidade implementada permite dividir a rede em regiões de acordo com restrições de capacidade. Este procedimento pode ser útil em aplicações práticas como a coleta de produtos por veículos ou a aquisição de dados por empregados do serviço público.

O Problema de Agrupamento Capacitado pode ser descrito como o problema em que um dado conjunto de elementos deve ser dividido em um dado número de subconjuntos. Cada elemento tem um peso (ou demanda) associado e deve ser inserido em exatamente um subconjunto. Cada subconjunto tem uma capacidade que não deve ser excedida. Uma medida de distância (ou custo) entre cada par de elementos deve ser determinada. Para cada subconjunto, a soma das distâncias de cada ponto até um determinado ponto “central” deve ser minimizada. O objetivo é encontrar os pontos centrais e, conseqüentemente, os subconjuntos, que minimizam a soma total das distâncias para todos os subconjuntos. Este problema é NP-Completo e heurísticas são requeridas (Figura 4.13).

Na classe Net foi criado um método chamado seedClustering que usa uma heurística de busca local para encontrar os pontos centrais dos agrupamentos de ruas. O número de agrupamentos desejados deve ser sabido previamente, e as posições iniciais dos pontos centrais são dadas em uma camada de pontos de interesse do banco de dados, que é inserida no grafo como vértices. Esses pontos são chamados de “sementes” para formar os agrupamentos. A atribuição de uma rua a uma semente é baseada na distância da semente à rua. O método considera essa medida como a distância de custo mínimo da semente à extremidade mais próxima da rua, mais o comprimento da rua. As demandas das ruas são dadas por um de seus atributos, e a capacidade de cada semente é dada por um de seus atributos.

A heurística de busca local move cada semente para o vértice vizinho, que produz a maior redução de custo total das distâncias das ruas associadas à semente. A vizinhança é limitada por um raio de distância passado como um parâmetro à rotina. Este processo é repetido até que nenhuma melhoria seja obtida e as sementes se estabilizem. Técnicas similares foram usadas em outros trabalhos (Lorena e Pereira, 2002).

As distâncias são calculadas com Dijkstra, e a associação das ruas às sementes, respeitando suas capacidades, é feita por uma heurística desenvolvida para resolver o chamado Problema Generalizado de Atribuição.

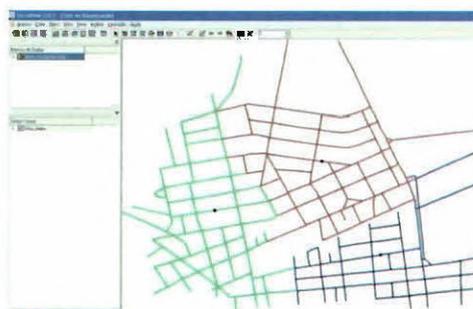


Figura 4.13 – Agrupamento capacitado no TerraView – projeto TerraNetwork.

Para facilitar a interação com o usuário, foi criado um “plugin” que funciona através de uma biblioteca de ligação dinâmica reconhecida pelo software TerraView (<http://www.dpi.inpe.br/terraview>). Na página do projeto (<http://www.lac.inpe.br/~terrannetwork>) pode ser encontrado, além do “plugin”, um manual de uso e alguns dados para experimentação (Figura 4.14).

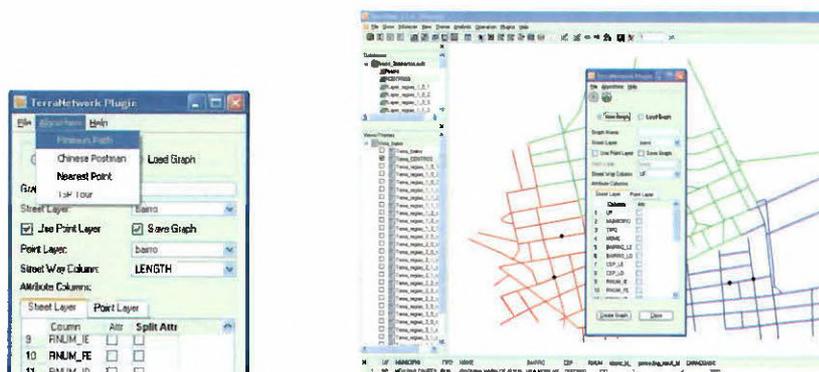


Figura 4.14 – “Plugin” para o TerraView – projeto TerraNetWork.

Visando à divulgação dos resultados pela Internet, foi criado um site para apresentação do projeto, de seus objetivos, da equipe de trabalho, e dos resultados obtidos. Esse site está acessível em <http://www.lac.inpe.br/~terrannetwork>.

4.7 Algoritmos e aplicações

Nesta seção será descrita a heurística de localização-alocação alternada, sugerida para aproximar a solução de problemas de *clustering*. Também serão comentados outros algoritmos mais elaborados que encontram soluções de melhor qualidade.

Observe inicialmente que, cada vez que se identifica um conjunto de p centros abertos (medianas ou centros para cobertura), também são identificados p clusters C^k , $k \in \{1, 2, \dots, p\}$, formados pelos centros abertos e os alocados a estes (ou cobertos por estes). Pode-se então tentar melhorar a qualidade das localizações e alocações

(coberturas) realizando trocas dentro dos *clusters* (e para cada *cluster*), realocando (cobrindo) e formando novos *clusters*.

A heurística de localização-alocação foi inspirada nos trabalhos de (Cooper, 1963). Uma solução inicial pode ser melhorada procurando-se por uma nova mediana (centro aberto) dentro de cada *cluster*, trocando-se a mediana atual por um nó não mediana e recalculando-se as alocações (coberturas). Este processo se repete até que não seja mais possível obter melhorias no custo total da alocação (cobertura).

O algoritmo de localização-alocação está descrito a seguir em pseudocódigo:

Enquanto (*solução-inicial* melhora)

 Para $k = 1, \dots, p$

 Troque vértices mediana e não-mediana do *cluster* C^k ;

 Calcule o valor v correspondente à melhor realocação (cobertura);

 Se v é melhor que *solução-inicial*

 Atualize a mediana do *cluster* C^k ;

 Faça *solução-inicial* = v ;

 Fim_se;

 Fim_para;

Fim_enquanto;

A troca entre vértices mediana e não-mediana em cada *cluster* C^k , $k = 1, \dots, p$, pode ser executada para:

- todos os vértices não-mediana do *cluster* C^k ,
- apenas para os vértices não-mediana alocados (cobertos) do *cluster* C^k ,
- ou apenas para os vértices não-mediana localizados a uma certa distância (ou tempo) do vértice mediana do *cluster* C^k .

A Figura 4.15 apresenta uma ilustração da heurística de localização-alocação para o caso do problema de máxima cobertura.

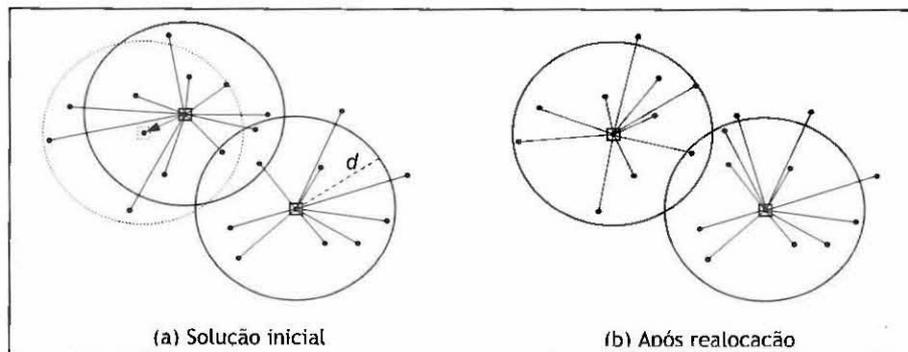


Figura 4.15 – Ilustração da heurística de localização-alocação.

Caso os *clusters* apresentem capacidades, estas devem ser conservadas na definição dos novos *clusters*, isto é, as capacidades dos caminhões não podem ser excedidas (para o roteamento). Se repetida para várias soluções iniciais, esta heurística é capaz de encontrar bons resultados para problemas com distribuição espacial dos dados. A Figura 4.16 mostra um passo do algoritmo para aplicação de formação de grupos capacitados implementada no TerraNetwork.

Esta heurística foi usada ainda como heurística de melhora de soluções combinada com heurísticas Lagrangeanas (ou Lagrangeanas/surrogate) (Lorena e Senne, 1999), ou ainda como um processo de mutação no algoritmo genético construtivo aplicado ao problema de p-medianas (Lorena e Furtado, 2001). Os resultados foram bastante satisfatórios, embora possam ser considerados computacionalmente excessivos para problemas grandes. Nestes casos devemos restringir o alcance das trocas dentro dos *clusters*.

Para a solução do modelo de roteamento 'd)', como o número de colunas é muito grande, resolve-se a versão de programação linear do problema por um método conhecido como de geração de colunas. As colunas não são armazenadas explicitamente e são geradas quando necessário.

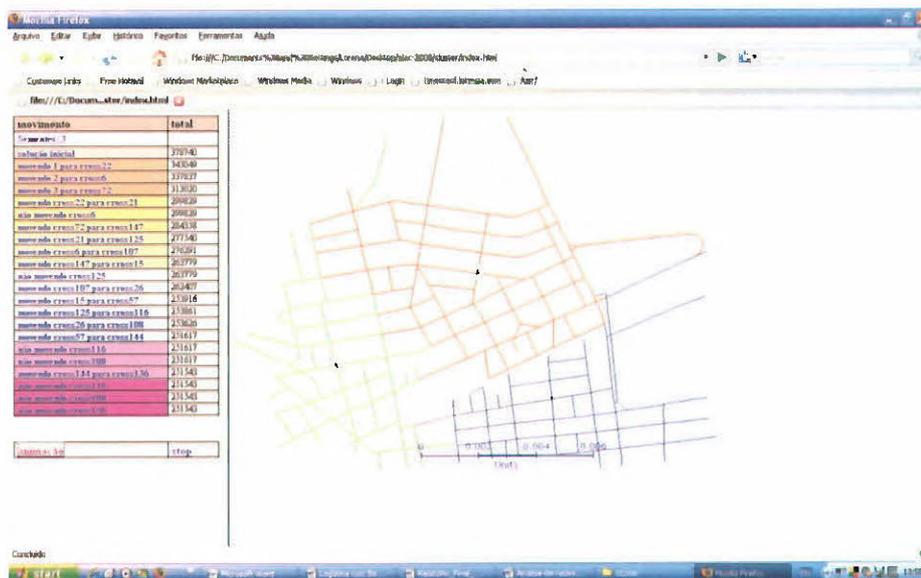


Figura 4.16 – Heurística de localização-alocação para agrupamento capacitado.

4.8 API para visualizadores WEB

Atualmente, está sendo desenvolvida no LAC/INPE uma API (Application Programming Interface) que irá usar um ambiente WEB (Internet) para integração dos códigos implementados no projeto TerraNetwork. Pretende-se usar o TerraPHP (www.terralib.org), desenvolvido na DPI/INPE, o GoogleMaps (<http://www.maps.google.com/>) ou o YahooMaps (<http://maps.yahoo.com/>), entre outros visualizadores WEB. Estes últimos, principalmente o Googlemaps, são de fácil utilização, grande abrangência de recursos e divulgação e exibição de mapas de regiões brasileiras.

Inicialmente optou-se pelo uso do ambiente de desenvolvimento PHP + MySQL para integrar os algoritmos de redes desenvolvidos no Terranetwork e disponibilizá-los via internet. Outros bancos de dados que manipulam dados geográficos podem ser usados no futuro com possíveis vantagens ao MySQL padrão. A manipulação de grafos utilizou a Boost Graph Library (<http://www.boost.org>), que possui uma série de implementações eficientes de algoritmos conhecidos.

A linguagem PHP foi utilizada para implementar:

- Uma função de “geocoding” de endereços usando os conceitos de interpolação (http://www.dpi.inpe.br/terralib/html/v314/group__geo_cod.html);
- Funções que referenciam os algoritmos de redes implementados na linguagem C. Inicialmente foi testado somente o Algoritmo de Dijkstra para caminhos de menor custo;
- Funções que manipulam a montagem e estrutura dos grafos que descrevem as redes;
- Funções que manipulam os dados armazenados em MySQL (endereços, comprimento de rua, mão de rua, CEP, etc.);
- Uma classe com funções para transformação dos atributos de dados georeferenciados no formato Shapefile da ESRI para um formato de banco de dados (no nosso caso, o SQL).

4.9 Considerações Finais

Serviços de localização e roteirização com dados georeferenciados têm se destacado como essenciais neste início de século. Os problemas combinatoriais de localização de facilidades e roteamento de veículos estão se beneficiando desta popularização dos serviços baseados em localização para serem difundidos ao usuário comum, prefeituras, transportadoras, entre outros.

Os grafos representam as redes georeferenciadas e proporcionam ambientes adequados para a definição e modelagem de diversos problemas importantes. Neste texto, foram descritos problemas de localização e roteamento de veículos que podem ser modelados e resolvidos com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas e visualizadores WEB. São problemas de grande importância econômica para planejamento estratégico de setores produtivos, indústrias, prefeituras, comércio, entre outros. A otimização destes modelos pode levar a grandes economias em seus investimentos.

Vários são os modelos de localização e roteamento consagrados na literatura. Foram descritos os modelos de cobertura e localização de medianas e de roteamento como cobertura de rotas. Foi apresentada uma heurística simples que pode resultar em boas soluções para problemas de localização e alguns problemas de roteamento (formulados como *clustering*). Os projetos ARSIG, ARSIG2 e TerraNetwork foram brevemente descritos.

Agradecimentos: O autor agradece ao apoio financeiro parcial da FAPESP e CNPq. Também agradece aos participantes dos projetos ARSIG, ARSIG2, TerraNetwork e API-redes.

Referências

- ARSIG – Análise de redes com sistemas de informações geográficas. Projeto temático FAPESP. Junho 1997 / junho 1999, <http://www.lac.inpe.br/~lorena/ArsigIndex.html>
- ARSIG2 – Sistemas de apoio à decisão usando redes e sistemas de informações geográficas. Projeto temático FAPESP. Julho 2000 / julho 2002, <http://www.lac.inpe.br/~lorena/ArsigIndex.html>
- Chaves, A. A. ; Correa, F. A. and Lorena, L. A. N. Clustering Search Heuristic for the Capacitated p-median Problem. Springer Advances in Software Computing Series, v. 44, pp. 136-143, 2007

- Correa, F. A.; Chaves, A. A. and Lorena, L. A. N. Hybrid heuristics for the probabilistic maximal covering location-allocation problem. *Operational Research Journal*, 2007 – to appear.
- Cooper, L. Location-allocation problems. *Operations Research*, 11: 331-343, 1963.
- Daskin, M. (1995). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*. Wiley Interscience, New York, USA.
- Desrosiers, J. ; Dumas Y.; Solomon, M. M. and Soumis, F. Time constrained routing and scheduling. In *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol8, Network routing, Ball, M. O , T. L. Magnanti and G. L. Nemhauser (eds.) North-Holland, 1995.
- Drezner, Z. (Editor) (1995). *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*. Springer-Verlag, New York, USA.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, Inc. *Avenue Customization and Application Development for ArcView*, Redlands, CA, 1996.
- Hillsman, E. L. (1984). The p-Median Structure as a Unified Linear Model for Location-Allocation Analysis. *Environmental and Planning A*, 16: 305-318.
- Laporte, G. What You Should Know about the Vehicle Routing Problem . *Les Cahiers du GERAD*, G-2007-59 August 2007 .
- Larson, R.C.; Odoni, A.R. *Urban Operations Research*, Prentice Hall, NJ, 1981.
- Lorena, L.A.N.; Furtado, J.C. Constructive genetic algorithm for clustering problems. *Evolutionary Computation* 9 (3): 309-327, 2001
- Lorena, L. A. N. and Pereira M. A. A Lagrangean/surrogate heuristic for the maximal covering location problem using Hillsman's edition. *International Journal of Industrial Engineering* 9(1), 57-67, 2002
- Lorena, L.A.N.; Senne, E.L.F. Improving traditional subgradient scheme for Lagrangean relaxation: an application to location problems. *International Journal of Mathematical Algorithms*, 1: 133-151, 1999.
- Lorena, L. A. N. ; Senne, E. L. F. ; Paiva, J. A. C. e Pereira M. A. Integração de modelos de localização a sistemas de informações geográficas. *Gestão e Produção* 8(2):180-195, 2001.
- Marianov, V.; Serra, D. Probabilistic, maximal covering location-allocation models for congested systems. *Journal of Regional Science*, v. 38, n. 3, p. 401-424, 1998.
- Pereira, M. A.; Lorena, L. A. N. and Senne, E. L. F. A column generation approach for the maximal covering location problem. *International Transactions in Operations Research*, v. 14, p. 349-364, 2007
- Senne, E. L. F. and Lorena, L. A. N. (2000). Lagrangean /Surrogate Heuristics for p-Median Problems. In *Computing Tools for Modeling, Optimization and Simulation: Interfaces in Computer Science and Operations Research* (Eds.: M. Laguna and J. L. Gonzales-Velarde). Kluwer Academic Publishers, New York, pp. 115-130.
- Senne, E.L.F. ; Lorena, L.A.N. and Pereira, M. A. A branch-and-price approach to p-median location problems *Computers & Operations Research* 32 (6): 1655-1664, 2005
- Senne, E.L.F. ; Lorena, L.A.N. and Pereira, M. A. A simple stabilizing method for column generation heuristics: an application to p-median location problems. *International Journal of Operations Research*, vol. 4, pp. 1-9, 2007
- SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas, INPE, São José dos Campos, SP, <http://www.dpi.inpe.br/spring>, 1998.
- TerraNetwork – Sistema de Análise de Redes Urbanas, INPE, São José dos Campos, SP, <http://www.lac.inpe.br/~terrane트워크>, 2007.