

# ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS EM PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES

**Sílvia Maria Santana Mapa**

**Renato da Silva Lima**

Universidade Federal de Itajubá  
Instituto de Engenharia de Produção e Gestão

## RESUMO

O objetivo do trabalho é avaliar a qualidade das soluções para o problema de localização de instalações geradas pelo SIG (Sistema de Informação Geográfica) TransCAD®, obtidas após a utilização combinada de suas rotinas *Facility Location* e *Transportation Problem*, quando comparadas com as soluções ótimas, obtidas a partir de modelo matemático exato baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), desenvolvido externamente ao SIG. Os modelos foram aplicados a três simulações: a primeira propõe a abertura de fábricas e alocação de clientes no estado de São Paulo; a segunda envolve um atacadista e um estudo de localização para centros de distribuição e alocação dos clientes varejistas; e a terceira localiza creches em um contexto urbano, alocando a demanda. Os resultados mostraram que quando se considera a capacidade das instalações, o modelo otimizador PLIM chega a apresentar resultados 37% melhores do que o SIG, além de propor locais diferentes para abertura de novas instalações.

## ABSTRACT

This work aims to evaluate the quality of the solutions for the facility location problem, generated by the TransCAD® GIS (Geographic Information System) software, obtained after the combined use of its Facility Location and Transportation Problem routines, when compared with the optimal solutions, obtained from the exact mathematical model based on the Mixed Integer Linear Programming (MILP), developed externally to the GIS. The models have been applied to three simulations: the first one proposes factories openings and customers' allocation in the state of São Paulo; the second one involves a wholesaler and a location study for distribution centers and the customers retailers' allocation; and the third one locate day-care centers in an urban context, allocating the demand. Results showed that when the capacity of the facilities is considered, the optimal MILP model gives results 37% better than GIS, and additionally identifies different locations for the new facilities.

## 1. INTRODUÇÃO

Problemas de localização-alocação de instalações, em sua grande parte, são problemas complexos, por envolverem um grande número de variáveis e grandes volumes de dados. À medida que a complexidade do problema aumenta, os estudos de localização necessitam de novas tecnologias de informação, que permitem tratar os sistemas de forma efetivamente integrada. Segundo Bowersox e Closs (2001), os avanços significativos da tecnologia de computação e a crescente complexidade da tomada de decisões estimularam o interesse em instrumentos computacionais para melhorar a eficácia das decisões espaciais, em particular as decisões de localização de instalações.

A abordagem de modelos de localização de facilidades tem sido proposta por meio de ferramentas de auxílio à decisão espacial, principalmente quando uma base de dados geograficamente referenciada se encontra disponível. Neste caso, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são de vital importância na coleta e análise desses dados, pois integram uma sofisticada interface gráfica a uma base de dados geograficamente referenciada, constituindo-se em poderosas ferramentas de análise e planejamento espacial (Lima, 2003). Os Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao Transporte (SIG-T) são uma classe especial dos SIG, sendo aplicados na área de planejamento e operação de transportes. Dentre suas diversas funcionalidades, possuem módulos dedicados à localização de instalações

(fábricas, centros de distribuição, escolas etc.) e da alocação dos clientes a estas unidades, buscando reduzir os custos de deslocamento ou transporte.

Diversos *softwares* são utilizados no auxílio a problemas de localização. Porém, a maioria deles acaba funcionando como uma “caixa preta”: seus métodos de solução não são transparentes, restando aos usuários em geral a hipótese de acreditar na eficiência dessas soluções. A partir de experiências anteriores efetuadas nos módulos de localização-alocação do SIG-T TransCAD<sup>®</sup>, versão 4.5, constatou-se que este resolve o problema, porém em duas etapas distintas. A primeira engloba a rotina *Facility Location* (FL), que identifica as melhores localizações para as instalações, propondo a abertura de novas unidades ou fechamento das já existentes, e procede a alocação entre demanda e oferta, porém sem levar em consideração a capacidade máxima de operação das instalações. Para impor esta restrição de limite de capacidade, faz-se necessário submeter a solução da rotina FL à rotina *Transportation Problem* (TP), caracterizando a segunda etapa de solução do problema no SIG. Sendo assim, a solução da rotina FL se torna a entrada da rotina TP, que irá realocar a demanda à oferta segundo o critério de limite máximo de capacidade das instalações. Porém, esta segunda rotina não mais admite a abertura ou fechamento das instalações previamente geradas na rotina FL, ficando pré-condicionada àquela configuração inicial, situação que claramente pode comprometer a qualidade da solução final. Adicionalmente, há que se considerar que ambas as rotinas trabalham com algoritmos heurísticos na busca das soluções. Conseqüentemente, não se garante que a solução encontrada após a utilização das rotinas seja a solução ótima, o que só se saberia ao certo com a resolução do problema via algoritmo otimizante.

Esse é o ponto de partida para o presente trabalho, cujo objetivo é avaliar a qualidade das soluções para o problema de localização-alocação de instalações geradas pelo SIG TransCAD<sup>®</sup>, obtidas após a utilização combinada de suas duas rotinas, *Facility Location* e *Transportation Problem*, quando comparadas com as supostas soluções ótimas, obtidas a partir de um modelo matemático desenvolvido externamente ao SIG. Este modelo foi formulado baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e busca a melhor solução matemática do problema de localização-alocação, podendo realizar a localização e alocação das instalações aos seus clientes, obedecendo aos limites de capacidade máxima destas instalações, de forma simultânea, ao contrário do uso das rotinas combinadas do SIG.

Na metodologia de pesquisa do trabalho, classificada como modelagem e simulação, tanto o modelo SIG quanto o modelo PLIM foram aplicados a três simulações, de diferentes níveis de complexidade. A primeira propõe a abertura de fábricas e alocação de clientes, compreendendo o estado de São Paulo e 18 de seus principais municípios. A segunda envolve um atacadista, na qual se fará o estudo de localização para centros de distribuição e alocação de seus clientes varejistas. Na terceira, o objetivo será o de localizar Creches e conseqüente alocação da demanda (crianças de 0 a 3 anos) na cidade de São Carlos, SP, Brasil. Depois de efetuadas as simulações propostas, as soluções geradas pelos modelos SIG e PLIM foram comparadas e analisadas, considerando ou não as restrições de capacidade. O trabalho está estruturado da seguinte maneira: após esta introdução, apresentam-se na seção 2 algumas considerações acerca de problemas de localização-alocação de instalações e SIG. A seção 3 apresenta a metodologia de pesquisa adotada e as três simulações efetuadas. A seção 4 traz as conclusões do trabalho, seguidas da lista com as referências bibliográficas utilizadas.

## 2. LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE INSTALAÇÕES

De forma geral, o problema de localização-alocação envolve a escolha dos melhores locais para múltiplas instalações, dentro de um conjunto de locais possíveis, definidos em uma rede logística. Estas instalações, do ponto de vista da modelagem, são nós de uma rede, onde ocorrem as operações logísticas. Redes são estruturas compostas por nós e arcos, que unem esses nós, aos quais serão alocados fluxos de transporte. O objetivo do problema de localização-alocação é encontrar a melhor solução, que minimize os custos logísticos, dentro dos seguintes termos (Bowersox e Closs, 2001):

- Definir a quantidade de instalações;
- Definir as melhores localizações das instalações;
- Definir as alocações, ou seja, a porcentagem de demanda de cada cliente suprida por cada centro de oferta, de forma que a demanda total dos clientes seja completamente atendida pelas facilidades em operação;
- Restringir a capacidade física de cada instalação dentro de limites máximos de operação, previamente estabelecidos.

De acordo com Novaes (2007), o problema de localização de instalações tem sido tratado em seus vários níveis de complexidade, englobando desde problemas simples de localização de uma única instalação, até problemas que envolviam diversas instalações, em diferentes níveis de uma cadeia produtiva, com restrições de capacidade e considerações de previsões de mercado. Para Hamad (2006), a maioria dos problemas de localização tem como função, em geral, a minimização de custos logísticos, principalmente os custos de transporte, em detrimento da maximização de lucros.

Aplicações de problemas de localização de instalações ocorrem nos setores privado e público. O objetivo pode ser reduzir custos em transportes, maximizar a área de cobertura, aumentar o nível de acessibilidade da demanda, reduzir ao máximo os custos com instalações, entre outros. Alguns exemplos de problemas de localização no setor público: localização de creches e postos de saúde (Lima, 2003; Santos *et al.*, 2005; Dutra, 1998), escolas públicas de ensino fundamental (Pizzolato e Silva, 1997), estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários (Naruo, 2003) e localização de áreas públicas de lazer (Yeh e Chow, 1996). Alguns exemplos de trabalhos com aplicações em localização no setor privado: centros de *cross-docking* para uma rede de produtos farmacêuticos (Dobrusky, 2003), terminais de consolidação para uma empresa de transporte de carga parcelada (Silva, 2004), localização de fábricas e/ou depósitos em escala global para corporações transnacionais (Hamad, 2006).

Owen e Daskin (1998) fizeram uma revisão de literatura, classificando os modelos de localização de facilidades. O modelo matemático desenvolvido neste trabalho enquadra-se na esfera estático-determinística, resolvido por uma variante do método das  $p$ -medianas, no qual o objetivo é encontrar a localização de  $p$ -facilidades tal que a distância total entre centros de demanda e oferta seja minimizada e, simultaneamente, alocam-se os fluxos entre as facilidades e os clientes.

Conforme já citado, a abordagem de modelos de localização tem sido proposta, atualmente, com o auxílio dos SIG. No entanto, de acordo com Fleury *et al.* (2000), infelizmente o uso de SIG no Brasil tem como limitante, na maioria das vezes, a escassez de uma base de dados confiável e atualizada, tanto em relação a dados espaciais ou digitalizados, quanto a dados

demográficos e sócio-econômicos. Essa situação é muito séria, em que pesem os esforços de algumas entidades e empresas, que vêm tentando suplantar tais deficiências. Falta, por parte da administração pública, uma política que incentive e estabeleça regras e responsabilidades no que diz respeito à preparação e disponibilização de bancos de dados geográficos.

### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA E SIMULAÇÕES

O principal objetivo do trabalho é avaliar a qualidade da solução do problema de localização-alocação de instalações gerada pelo *software* SIG, em suas rotinas combinadas: *Facility Location* e *Transportation Problem*, quando comparadas à solução ótima obtida no modelo baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Esse modelo, doravante denominado PLIM, foi formulado segundo o modelo das  $p$ -medianas, uma vez que, segundo Church e Sorensen (1996) e Vallim Filho (2004), a Programação Linear Inteira Mista é o método matemático mais empregado para resolução de problemas de localização formulados segundo o modelo das medianas, conduzindo para a solução matemática ótima do problema.

O modelo PLIM foi desenvolvido utilizando o *software* de otimização LINGO<sup>®</sup>, versão 7.0, um programa computacional modelador e otimizador utilizado para resolução de problemas de programação linear e não-linear, contando ainda com uma interface a planilha eletrônica do *software* Excel<sup>®</sup>, versão 10, permitindo uma maior facilidade na organização dos dados e visualização numérica dos resultados. A formulação matemática do modelo PLIM foi estabelecida em função de alguns parâmetros e variáveis, que definiram a função objetivo e restrições do modelo, conforme apresentado na sequência.

*Função Objetivo:*

$$\min fo = \sum_i \sum_j C_{i,j} * X_{i,j} * d_j \quad (1)$$

*Sujeito a:*

$$\sum_i z_i = p \quad (2)$$

$$X_{i,j} \leq z_i \quad \forall_{i,j} \quad (3)$$

$$\sum_i X_{i,j} = 1 \quad \forall_j \quad (4)$$

$$\sum_j d_j * X_{i,j} \leq m_i * z_i \quad \forall_i \quad (5)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall_i \quad (6)$$

$$X_{i,j} \in Z^+ \quad \forall_{i,j} \quad (7)$$

Onde  $X_{i,j}$ : é a matriz solução. Indica a porcentagem da demanda de  $j$  atendida por  $i$ ;  
 $C_{i,j}$ : matriz de custos, representada pelas distâncias mínimas entre os pontos  $i$  e  $j$ ;  
 $z_i$ : é um vetor de binários, que indica quais facilidades estão abertas. Se  $z_i = 1$ , a facilidade  $i$  está aberta. Caso contrário, se  $z_i = 0$ , então a facilidade  $i$  não está em operação;  
 $d_j$ : vetor que armazena as demandas dos clientes  $j$ ;  
 $m_i$ : parâmetro de entrada que define a capacidade máxima da facilidade  $i$ ;  
 $p$ : parâmetro de entrada que especifica a quantidade de facilidades a serem abertas.

A equação (1) representa a função objetivo do modelo, que visa minimizar o custo de transporte, em função das distâncias entre os pontos  $i$  (conjunto de facilidades) e  $j$  (conjunto de clientes), ponderado pela porcentagem da demanda atendida, assim como a função objetivo utilizada no SIG, para posterior comparação dos resultados gerados entre os dois modelos. Com relação às restrições, vale ressaltar que a equação (2) é a restrição que indica a quantidade de facilidades a serem abertas, equivalente ao número  $p$ ; (3) representa a restrição de abertura de facilidade, ou seja, se a facilidade  $i$  não está em operação ( $z_i = 0$ ), a alocação de demanda a esta facilidade deve ser nula; (4) é a restrição de cobertura de demanda, na qual todos clientes deverão ter o total de suas demandas atendidas; (5) é a restrição de limite superior de capacidades das facilidades a serem abertas; (6) torna o vetor de saída  $z_i$  um vetor de binários; e (7) torna a matriz solução  $X_{ij}$  uma matriz de inteiros.

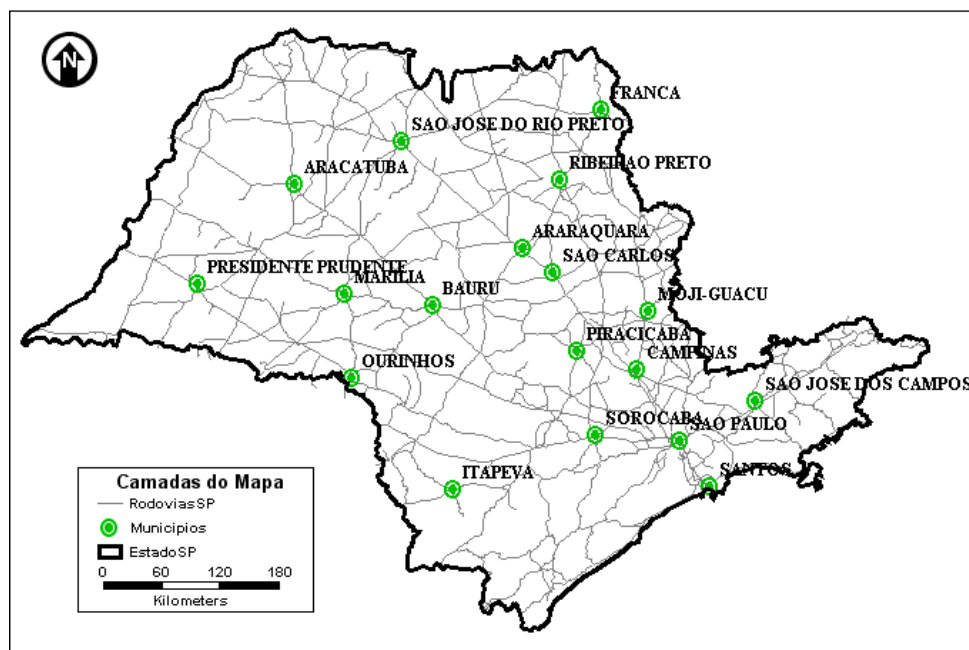
A metodologia de pesquisa adotada neste trabalho pode ser classificada como uma pesquisa científica de natureza aplicada, segundo abordagens qualitativas e, principalmente, quantitativas, com objetivos exploratórios e utilizando-se da modelagem e simulação como procedimento técnico (Bertrand e Fransoo, 2002). Ela foi posta em prática em três simulações distintas, segundo os modelos SIG e PLIM, envolvendo diferentes níveis de complexidade, sempre obedecendo os mesmos parâmetros nos dois modelos:

- Simulação I: simulação com dados geográficos reais aplicados ao estado de São Paulo, envolvendo o fluxo de transporte entre fábricas e 18 municípios clientes.
- Simulação II: simulação em um atacadista, tendo por objetivo a minimização dos custos de transporte entre centros de distribuição e respectivos clientes varejistas.
- Simulação III: simulação de localização e distribuição entre creches públicas e alunos de uma cidade média paulista.

De forma geral, o problema de localização-alocação abordará a minimização de custos de transporte em uma rede logística, em que os centros de oferta (ou de distribuição) deverão atender totalmente às demandas dos clientes, estando ou não sujeitos à restrição de limite superior de capacidade das instalações. A função objetivo habilitada em todos os cenários simulados foi a de minimizar o custo médio de serviço de transporte, aqui admitido, por hipótese simplificadora, como sendo o custo de deslocamento através da rede logística. Essa hipótese não acarreta nenhum problema para o trabalho, visto que o objetivo é uma análise comparativa entre os modelos. Para suportar os cálculos dos modelos, foi utilizado um computador com processador AMD Sempron 2.600, de 1,83 GHz e 512 MB de memória RAM, operando sob o sistema operacional Microsoft Windows XP Professional.

### 3.1 Simulação I

O problema proposto para esta simulação é realizar a localização e respectiva alocação entre pontos de oferta (fábricas) e de demanda (clientes) no estado de São Paulo, englobando 18 de seus principais municípios de médio e grande porte, distribuídos por todo o estado. A representação gráfica do problema abordado pode ser visualizada na Figura 1. Para se localizar os pontos de oferta, a escolha se dará em um espaço discreto de pontos candidatos à localização de facilidades, que incluirá todos os municípios presentes na região, para os dois modelos, SIG e PLIM. Sendo assim, serão considerados os 18 municípios como candidatos à abertura de instalações. Foram gerados 4 cenários, simulando a abertura de apenas 1 instalação (Cenário 1) e a abertura de 1, 2 ou 3 instalações adicionais àquela aberta no Cenário 1 (Cenários 2, 3 e 4, respectivamente).



**Figura 1:** Representação da região para a Simulação I

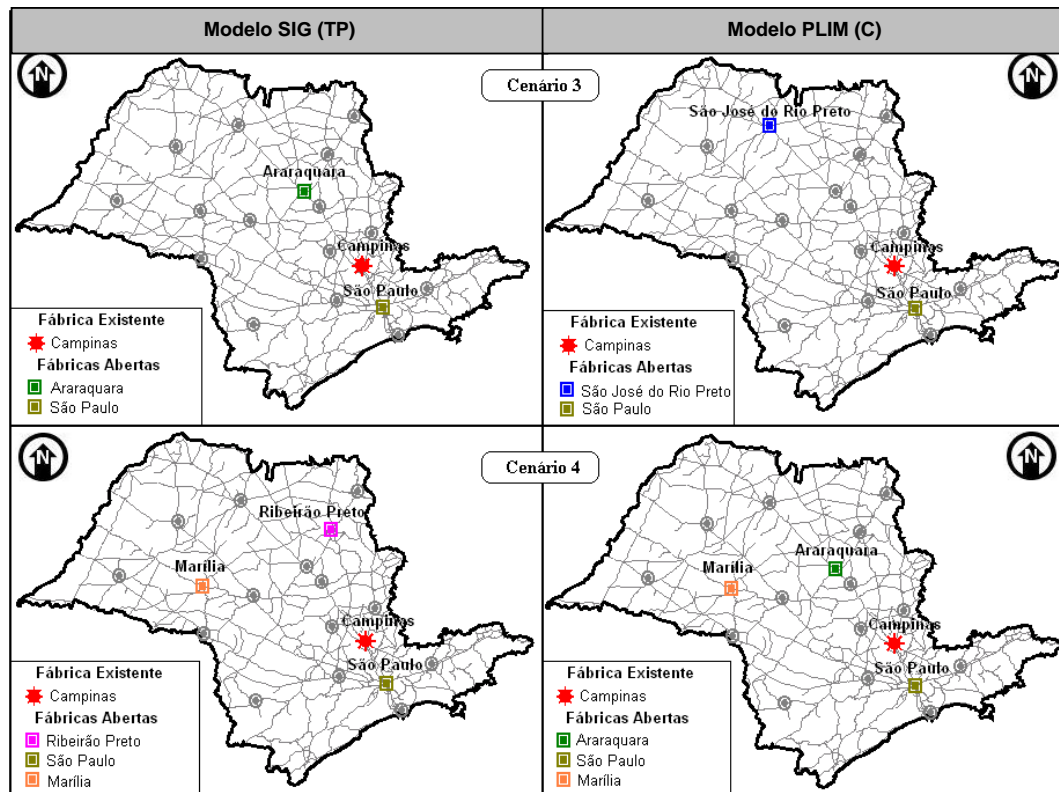
A Tabela 1 apresenta os resultados da simulação em termos de custos totais de deslocamento para os cenários simulados nos dois modelos, e uma comparação percentual entre estes custos. Comparando as soluções geradas pelos modelos SIG e PLIM, nota-se que, em um primeiro momento, os dois modelos comportam-se de forma semelhante. As soluções produzidas pelo SIG, em sua rotina *Facility Location* (FL), foram iguais às geradas pelo modelo PLIM, em sua rotina Não-Capacitada (NC), para todos os cenários simulados. Partindo para a comparação entre o modelo SIG em sua rotina *Transportation Problem* (TP), que não permite alterar a localização das fábricas obtidas pela rotina FL, e o modelo PLIM, em sua rotina Capacitada (C), percebe-se, através da comparação entre os mapas apresentados na Figura 2, que as soluções de localização dos Cenários 3 e 4 foram diferentes entre os dois modelos. Para o cenário 3 de simulação, o modelo SIG localiza uma fábrica em Araraquara, e o modelo PLIM, uma fábrica em São José do Rio Preto. No Cenário 4, o modelo SIG localiza uma fábrica em Ribeirão Preto e o modelo PLIM localiza em Araraquara. Estes diferentes locais de instalação das fábricas refletem em maiores ou menores custos de transporte, com reduções de 7,7% e 1,5%, respectivamente, nos cenários 3 e 4, sempre a favor do modelo PLIM.

**Tabela 1:** Comparação das soluções dos modelos SIG e PLIM para Simulação I

Cenário	Modelo SIG		Modelo PLIM		Variação (%)	
	FL	TP	NC	C	FL vs. NC	TP vs. C
	Custo Total (Km)	Custo Total (Km)	Custo Total (Km)	Custo Total (Km)	Custo Total (Km)	Custo Total (Km)
1	34.954	34.954	34.954	34.954	0,0 %	0,0 %
2	23.740	24.034	23.740	24.034	0,0 %	0,0 %
3	19.609	22.177	19.609	20.597	0,0 %	7,7 %
4	15.591	16.913	15.591	16.660	0,0 %	1,5 %

Outro fator importante de comparação são os tempos de processamento consumidos pelos modelos SIG e PLIM para geração dos cenários de simulação. Para ambos os modelos, este tempo ficou na ordem de um segundo, ou seja, não constituiu empecilho para a geração das soluções no modelo exato PLIM, se assemelhando ao tempo computacional consumido pelo

SIG. Porém, o problema abordado nesta simulação é de pequeno porte. Com o intuito de averiguar a capacidade de solução dos modelos para problemas de maiores complexidades, procedeu-se as Simulações II e III, a seguir, com um número maior de variáveis envolvidas.



**Figura 2:** Soluções geradas pelos modelo SIG e PLIM na Simulação I

### 3.2 Simulação II

Na Simulação II, o objetivo foi localizar centros de distribuição (CD's), para uma empresa atacadista que opera no Sul de Minas Gerais e estado de São Paulo. Para atender seus diversos clientes (aproximadamente 12.000), a empresa possui um único CD (15.000 m<sup>2</sup> de área de armazenagem), localizado na cidade de Poços de Caldas, MG. Para fins de simplificação do problema, todos os clientes pertencentes ao mesmo município foram agrupados e tiveram suas demandas somadas em um único ponto, que indica a localização do centro geográfico daquele município-cliente. Sendo assim, gerou-se um total de 311 municípios-clientes, com suas respectivas localizações geográficas e demanda total.

O número de candidatos a CD's está restrito a 150 pontos para os dois modelos, SIG e PLIM, escolhidos entre aqueles municípios-clientes que possuem os maiores valores de demanda, considerados como candidatos potenciais, responsáveis por 89% da demanda total. Embora os 311 municípios-clientes pudessem vir a constituir o conjunto de candidatos, isso não aconteceu devido a restrições computacionais impostas pelo modelo PLIM. Apesar do Lingo não impor limites quanto ao número de variáveis e restrições do problema (apenas o tempo de processamento que se eleva de forma exponencial com relação à complexidade do problema), a planilha do Excel, em interface com o Lingo, impôs um limite máximo do número de colunas para armazenar a matriz de custo de transporte (256 colunas), contendo as distâncias entre os municípios-clientes e candidatos à localização.

Foram gerados 4 cenários, simulando apenas a alocação ideal dos clientes atuais (Cenário 1) e a abertura de 1, 2 ou 3 CD's adicionais ao já existente (Cenários 2, 3 e 4, respectivamente). Os municípios em que foram propostas localizações nos diferentes cenários são identificados nas tabelas por letras a saber: A: Poços de Caldas; B: Limeira; C: Pindamonhangaba; D: Campinas; E: Araraquara; F: Jundiaí e G: Rio Claro. Os resultados são apresentados na Tabela 2 (SIG), Tabela 3 (PLIM) e Tabela 4 (Comparação entre os modelos).

**Tabela 2:** Soluções geradas no modelo SIG para Simulação II

	Modelo SIG				
	Facility Location (FL)			Transportation Problem (TP)	
	CD's Abertos	Custo Médio (Km)	Custo Total ( $10^6$ Km)	Capacidades (Kg)	Custo Total ( $10^6$ Km)
Cenário 1	A	212	820	3.861.936	820
Cenário 2	A, B	121	461	1.930.968	506
Cenário 3	A, B, C	101	383	1.287.312	503
Cenário 4	A, C, D, E	83	315	965.484	402

**Tabela 3:** Soluções geradas no modelo PLIM para Simulação II

	Modelo PLIM					
	Não-Capacitada (NC)			Capacitada (C)		
	CD's Abertos	Tempo de Processo	Custo Total ( $10^6$ Km)	CD's Abertos	Tempo de Processo	Custo Total ( $10^6$ Km)
Cenário 1	A	00:00:01	820	A	00:00:01	820
Cenário 2	A, B	00:00:58	461	A, D	00:01:15	500
Cenário 3	A, B, C	00:15:38	383	A, F, G	00:33:57	410
Cenário 4	A, C, D, E	01:44:10	315	A, B, E, F	01:06:05	353

**Tabela 4:** Comparação das soluções dos modelos SIG e PLIM para a Simulação II

	Modelo SIG		Modelo PLIM		Variação (%)	
	FL	TP	NC	C	FL vs. NC	TP vs. C
	Custo Total ( $10^6$ Km)	Custo Total ( $10^6$ Km)	Custo Total ( $10^6$ Km)	Custo Total ( $10^6$ Km)	Custo Total ( $10^6$ Km)	Custo Total ( $10^6$ Km)
Cenário 1	820	820	820	820	0,0 %	0,0 %
Cenário 2	461	506	461	500	0,0 %	1,4 %
Cenário 3	383	503	383	410	0,0 %	22,6 %
Cenário 4	315	402	315	353	0,0 %	13,8 %

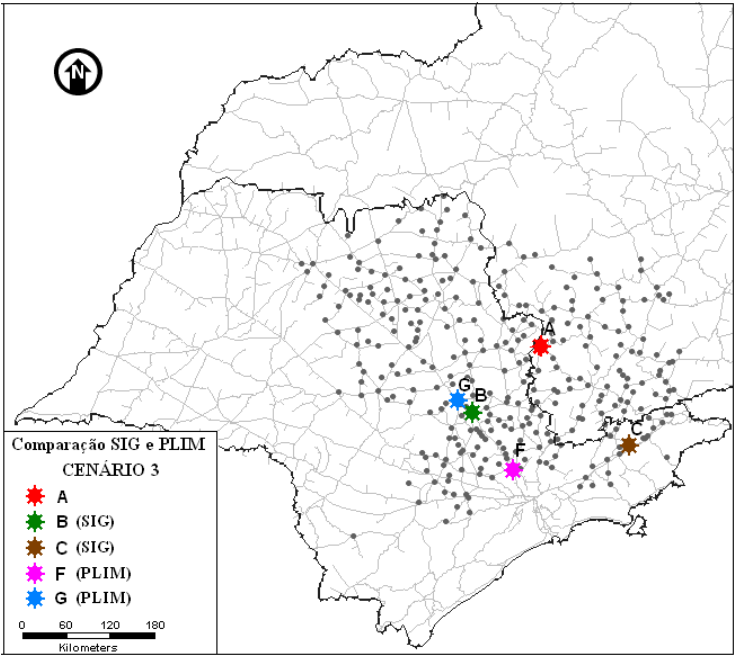
Na Tabela 3 pode-se observar que o modelo nos cenários 2, 3 e 4 do PLIM, em sua rotina Capacitada, indicou a abertura de CD's em locais diferentes aos de sua rotina Não-Capacitada, que por sua vez foram iguais aos do SIG (que obviamente são os mesmos em FL e TP, Tabela 2). Além disso, destaca-se que o tempo de processamento computacional para as rotinas NC e C crescem exponencialmente com a complexidade do problema, relacionado ao número de CD's a serem localizados. Essas diferentes localizações do modelo PLIM Capacitado reduziram em 22,6% e em 13,8% os custos de transporte, se comparado à rotina TP do modelo SIG. Como exemplo, são apresentadas as diferentes soluções de localização produzidas pelos modelos SIG e PLIM para o Cenário 3 na Figura 3.

### 3.3 Simulação III

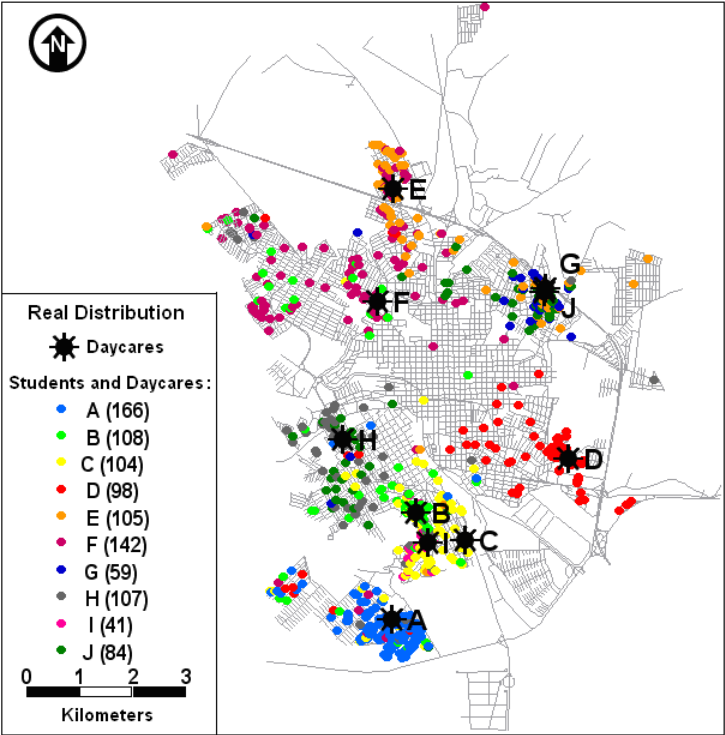
A simulação III abordou um problema de localização de instalações no setor público, o das creches municipais da cidade de São Carlos, região central do estado de São Paulo, tendo como público-alvo as crianças na faixa etária de 0 a 3 anos de idade. A localização espacial das escolas e o endereço de cada um dos alunos foram obtidos em trabalhos anteriores (Lima, 2003), a partir do georeferenciamento dos dados da Secretaria Municipal de Educação e da rede viária da cidade. O grau de desagregação de dados dessa simulação é total: cada um dos



1.014 alunos, distribuídos em 10 creches existentes, foi localizado individualmente. Os cenários simulados são apresentados na Tabela 5, sempre ressaltando que, nesse caso, a comparação também é feita em relação à atual distribuição dos alunos a cada uma das creches (cenário 'real'). A Figura 4 apresenta essa distribuição real, na qual as creches aparecem identificadas por letras de A a J, associadas às localizações dos alunos matriculados em cada uma delas. Na legenda do mapa, a cada creche está associado o número de alunos efetivamente matriculados.



**Figura 3:** Diferentes soluções produzidas entre os modelos SIG e PLIM (Simulação II)



**Figura 4:** Distribuição real das creches e respectivos alunos (Simulação III)

**Tabela 5:** Descrição dos cenários

<b>Real</b>	Localizações e alocações reais entre alunos e creches.
<b>Cenário 1</b>	Realocação dos alunos às 10 creches existentes.
<b>Cenário 2</b>	10 creches existentes, abertura de 1 nova unidade.
<b>Cenário 3</b>	10 creches existentes, abertura de 2 novas unidades.
<b>Cenário 4</b>	Fechamento de 1 das 10 creches existentes e a abertura de 1 nova unidade.

A situação desejável é que haja a maior concentração possível de alunos residindo próximo à unidade escolar que freqüentam, de forma a minimizar o custo de transporte. Considerações adicionais a respeito dessa distribuição real podem ser encontradas em Lima (2003), mas cabe destacar, resumidamente, que ela é bastante ruim (custo médio de 2,04 km, custo máximo de 10,52 km, custo total de 2070 km). O cenário mais simples (Cenário 1) já poderia diminuir os custos de deslocamento máximo e médio em cerca de 50% apenas com a realocação de cerca de 40% de alunos, sem abrir nenhuma nova creche e sem expandir a capacidade real. Obviamente, todos os outros cenários que incluíam a abertura de novas creches também apresentaram resultados melhores que a distribuição real.

Para simplificar o problema, as capacidades das creches foram consideradas como sendo o número de crianças atualmente matriculadas, com os ajustes proporcionais a essas capacidades quando se simulava a abertura ou fechamento de novas creches. Foram selecionados pontos como candidatos a localização de novas creches, distribuídos espacialmente de modo a cobrir toda a cidade e em número não muito elevado (120), para não tornar o problema demasiadamente grande para o modelo PLIM. Ainda assim, cabe destacar que em uma das simulações no modo capacitado, o modelo PLIM levou aproximadamente 2 horas de processamento para atingir a solução ótima.

Os resultados dos dois modelos são apresentados na Tabela 6, indicando o mesmo comportamento das simulações anteriores. Os dois modelos obtiveram os mesmos resultados para as rotinas que não envolviam a restrição de limite máximo de capacidade das instalações, na totalidade dos cenários simulados. Nas rotinas com restrição de capacidade, no entanto, em todos os cenários onde foi proposta a abertura e/ou fechamento de novas unidades, os modelos PLIM e SIG indicaram locais diferentes para tal. Como exemplo, para o Cenário 4, o modelo SIG localizou a nova creche ao Norte e o modelo PLIM ao Sul, o que no final revelou-se ser uma solução de custo 37% menor quando comparada com a do modelo SIG.

**Tabela 6:** Comparação das soluções dos modelos SIG e PLIM para a Simulação II

Cenários	Custos (km)	SIG		PLIM		Var (%)	
		FL	TP	NC	C	FL vs. NC	TP vs. C
<b>1</b>	Médio	0,99	1,10	0,99	1,10	0%	0%
	Máximo	5,28	5,34	5,28	5,34	0%	0%
	Total	1001	1120	1001	1120	0%	0%
<b>2</b>	Médio	0,86	1,23	0,86	1,08	0%	14%
	Máximo	5,20	5,20	5,20	5,28	0%	-2%
	Total	877	1244	877	1095	0%	14%
<b>3</b>	Médio	0,81	1,09	0,81	1,01	0%	7%
	Máximo	5,20	5,20	5,20	5,20	0%	0%
	Total	822	1102	822	1027	0%	7%
<b>4</b>	Médio	0,87	1,43	0,87	1,05	0%	37%
	Máximo	5,20	5,57	5,20	5,34	0%	4%
	Total	885	1452	885	1063	0%	37%

#### 4. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi avaliar a qualidade das soluções para o problema de localização de instalações geradas pelo SIG TransCAD, obtidas após a utilização combinada de suas duas rotinas *Facility Location* e *Transportation Problem*, quando comparadas com as soluções ótimas, obtidas a partir de um modelo matemático otimizador desenvolvido externamente ao SIG, baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Para tanto, os modelos foram aplicados a três simulações distintas, com diferentes níveis de complexidade.

Sabe-se que à rotina FL do SIG está associada uma modelagem heurística, e o que modelo PLIM é um modelo exato, garantindo a solução “ótima” do problema tratado. Visto que a heurística subordinada à rotina FL do SIG produziu soluções com as mesmas localizações e valores de custo total que a solução exata da rotina NC do modelo PLIM, nas três simulações propostas, uma conclusão importante diz respeito ao desempenho da heurística da rotina FL, classificando-a como de boa qualidade, no contexto das simulações efetuadas nesse trabalho, uma vez que esta convergiu para a solução matemática ótima nos cenários simulados.

Para as Simulações I, II e III, analisando as soluções finais dos cenários onde houve a abertura ou fechamento de novas unidades, o modelo PLIM sempre obteve melhores resultados que o SIG quando se considera a capacidade das instalações: menores custos de transporte (que chegou a ser 37% menor), com abertura de unidades em locais diferentes. Conclui-se assim que o modelo PLIM apresenta um melhor desempenho, provavelmente devido à resolução simultânea das fases de localização de instalações e alocação da demanda.

Cabe destacar que diversos testes foram também efetuados, em todas as simulações, relacionados ao limite superior de capacidade das instalações. Na medida em que se vai relaxando essa restrição, ou seja, ao invés de fixar um valor limite, estabelecer faixas de limite de capacidade, permitindo um aumento de suas capacidades, as soluções geradas pelo modelo SIG tendem a se aproximar das soluções PLIM. A restrição é relaxada até chegar ao ponto em que o problema se torna não-capacitado, em que a solução SIG se iguala à solução PLIM, gerando as mesmas localizações e alocações, e conseqüentemente mesmos valores de custos totais de transporte. Isto ocorre devido às maiores chances que o modelo SIG terá de realocar a demanda à oferta, localizadas anteriormente pela rotina FL, visto que as instalações possuirão um limite superior de capacidade maior, permitindo a alocação de maiores demandas.

Além disto, há que se considerar que a solução de problemas de localização-alocação de instalações está fortemente relacionada ao conjunto de candidatos à localização. Se este conjunto se altera, a solução do problema, e conseqüentemente os custos de transporte associados, tendem a se alterar. Sendo assim, quanto maior o número de locais candidatos, melhor deverá ser a qualidade esperada da solução. Porém, um acréscimo do número de variáveis do problema é proporcional à complexidade do mesmo, refletindo no aumento do tempo de processamento computacional consumido para geração da solução. Nesse aspecto, o modelo SIG leva vantagem, pois é baseado em heurísticas, o que permite trabalhar com um número maior de variáveis em um tempo de processamento computacional relativamente curto. Para todos os cenários simulados, o SIG gerou soluções sempre em um tempo inferior a 5 segundos. Já no modelo PLIM, baseado em algoritmo otimizador, o tempo de processamento foi bastante maior, chegando a consumir um máximo de quase 2 horas (1h:52m:14s) na rotina com restrição de capacidade. Para compensar esse tempo de

processamento computacional que se eleva exponencialmente, a solução é a redução no número de variáveis, o que de fato precisou ser feito nas Simulações II e III. Deste modo, sugere-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de um novo modelo externo ao SIG, que considere também a resolução simultânea das fases de localização de instalações e alocação da demanda, utilizando-se de um algoritmo heurístico para tal.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Ballou, R.H. (2006). *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/ Logística Empresarial*. 5ª. Edição. Porto Alegre: Bookman.
- Bowersox, D.J. & Closs, D.J. (2001). *Logística Empresarial: Processo de Integração da Cadeia de Suprimento*. São Paulo: Atlas.
- Bertrand, J.W.M. & Fransoo, J.C. (2002). Modelling and simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22, No. 2, 241-264.
- Church, R.L. & Sorensen, P. (1996). Integrating normative location models into GIS: problems and prospects with the p-median model. In: Longley P, Batty M. (eds). *Spatial Analysis: modeling in a GIS environment*. Cambridge, UK: GeoInformation International, p.167-183.
- Dobrusky, F.G. (2003). *Optimal Location of cross-docking centers for a distribution network in Argentina*. Dissertação (Mestrado em Logística), Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA.
- Dutra, N.G.S. (1998). *Planejando uma rede escolar municipal para reduzir custos de deslocamentos*. Dissertação (Mestrado em Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Fleury, P.F.; Wanke, P. & Figueiredo, K.F (2000). *Logística Empresarial: a perspectiva brasileira*. Atlas, São Paulo.
- Hamad, R. (2006). *Modelo para localização de instalações em escala global envolvendo vários elos da cadeia logística*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Lima, R.S. (2003). *Bases para uma metodologia de apoio à decisão para serviços de educação e saúde sob a ótica dos transportes*. Tese (Doutorado em Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Naruo, M.K. (2003). *O estudo do consórcio entre os municípios de pequeno porte para disposição final de resíduos sólidos urbanos utilizando Sistemas de Informações Geográficas*. Dissertação (Mestrado em Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Novaes, A.G. (2007) *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição*. 3ª. Ed.. Rio de Janeiro: Editora Campus.
- Owen, S.H. & Daskin, M.S. (1998). Strategic facility location: a review. *European Journal of Operational Research*, No. 111, 423-447.
- Pizzolatto, N.D. & Silva, H.B.F (1997). The location of public schools: evaluation of practical experiences. *International Transactions in Operational Research*, Vol. 4, No. 1, 13-22.
- Santos, V.S.; Lima, R.S.; & Silva, A.N.R. (2005). Using a cellular automata model to support the estimation of future transportation cost. *Proceedings 9th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (CUPUM)*, Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London, England, 29 June- July 2005.
- Silva, M.R. (2004). *Uma contribuição ao problema de localização de terminais de consolidação no transporte de carga parcelada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Vallim Filho, A.R.A. (2004). *Localização de centros de distribuição de carga: contribuições à modelagem matemática*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Yeh, A.G.-O. & Chow, M.H. (1996). An integrated GIS and location-allocation approach to public facilities planning: an example of open space planning. *Computers, Environmental and Urban Systems*, Vol. 20, No. 4-5, 339-350.