

APLICAÇÃO DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA A DISTRIBUIÇÃO DE ESTUDANTES EM ESCOLAS PÚBLICAS: UM ESTUDO DE CASO EM UM DISTRITO NO MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO – RJ

Anderson Velasco de Oliveira¹

Artur Alves Pessoa²

Marcos Costa Roboredo³

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para otimizar a distribuição de alunos em escolas públicas. Como estudo de caso, foram utilizados dados, obtidos via ferramentas computacionais, referentes às escolas e estudantes do ensino médio da rede estadual de educação, residentes no distrito de Neves, no município de São Gonçalo – RJ, tendo como referência o ano de 2014. É proposto neste trabalho um modelo de Programação Linear composto de duas fases: na primeira fase, o modelo visa maximizar o número de alunos que possam ir a pé até as suas escolas; na segunda fase, mantendo o número ótimo obtido na primeira fase de estudantes que podem ir a pé, o modelo redistribui os alunos minimizando a distância total percorrida pelos que não podem ir a pé. Os resultados apontam a possibilidade de mais de 90% dos alunos envolvidos no estudo de caso, serem alocados em escolas consideradas próximas às suas residências.

Palavras-chave: Alocação de Estudantes. Pesquisa Operacional. Sistema de Informação Geográfica.

Abstract: This study aims to propose a methodology to optimize the distribution of high school students in the public state education. As a study of case, some data were obtained referent to schools and students in Neves, district of the São Gonçalo city, in the Rio de Janeiro state - Brazil, using computational tools. To this end, it is proposed a Linear Programming model consisting of two steps: in the first step it maximizes the number of students at a walking distance to their schools; in the second step the model keeps these students assigned to the same schools and redistribute the other students while minimizing the total distance traveled by them.

Keywords: Student allocation. Operational Research. Geographic Information System.

¹ Production Engineering Department, Fluminense Federal University. E-mail: andersonvelasco@id.uff.br

² Production Engineering Department, Fluminense Federal University. E-mail: artur@producao.uff.br

³ Institute of Mathematics and Statistics, State University of Rio de Janeiro. E-mail: marcos.roboredo@ime.uerj.br

1. INTRODUÇÃO

O crescimento urbano tem sido um dos grandes desafios para população e governos em várias partes do mundo. Com tal crescimento há também o aumento da demanda por serviços públicos e, conseqüentemente, espera-se que os mesmos sejam acessíveis e com qualidade. Dentre os serviços públicos de maior demanda está a educação. Um grande número de alunos se matricula todos os anos nas instituições de ensino público no estado do Rio de Janeiro, englobando todos os segmentos, desde o nível pré-escolar até o nível superior.

A motivação para o estudo vem da carência de melhor aplicação de recursos públicos e a necessidade de melhoria no deslocamento urbano. No Estado do Rio de Janeiro, por exemplo, o estudante da rede estadual de ensino tem direito a gratuidade nos transportes públicos através de um cartão chamado RioCard Estudante (SEEDUC, 2014). Este benefício demanda recursos do governo que subsidia parte desta gratuidade. Portanto, diminuir a distância residência-escola-residência beneficia os “cofres públicos”, pois a demanda pela gratuidade diminuiria e, como consequência direta, o subsídio por parte do governo às empresas de transporte público sofreria um decréscimo, permitindo aplicação dos recursos não utilizados em outras áreas de interesse público.

Quanto ao tráfego, os horários de entrada e saída de alunos coincidem com os horários de maior número de veículos nas ruas. Quando os ônibus ficam muito tempo parados nos pontos para embarque/desembarque dos estudantes, o tráfego tende a piorar. A IBM® publicou um artigo intitulado “Estudo da IBM traz radiografia do trânsito em 20 metrópoles mundiais” (Sala de imprensa IBM®, 2010). Constatou-se, através do estudo divulgado pelo artigo, que o estresse causado pelo trânsito tem aumentado a níveis cada vez maiores, provocando conseqüências à saúde física e mental. Acredita-se então que diminuir a distância residência-escola significa

amenizar congestionamentos no trânsito, melhorando assim a qualidade de vida da população local e a dos estudantes.

Segundo o Censo Escolar de 2010 (INEP, 2014), dos 623.549 estudantes matriculados no ensino médio (EM) no Estado do Rio de Janeiro, 491.549 estavam matriculados na rede estadual de educação, sendo 442.046 na zona urbana. Assim sendo, considerando como um desafio alocar da melhor maneira possível essa grande quantidade de estudantes, o problema escolhido para o estudo foi o da distribuição dos alunos matriculados na rede estadual de educação visando minimizar a distância e, do mesmo modo, o tempo no deslocamento entre a residência e a escola de tais estudantes.

Este trabalho visa apresentar um modelo de Programação Linear que visa atribuir estudantes a escolas maximizando o número de estudantes que consigam ir a pé até sua escola. Como isto não é possível para todos os estudantes, é proposto ainda neste trabalho um modelo de pós-processamento que visa minimizar a distância percorrida pelos estudantes que não irão a pé até suas escolas, mantendo fixo o número de estudantes que podem ir a pé obtidos no modelo inicial.

Como estudo de caso, foram escolhidos os alunos do EM da rede estadual de ensino em uma região de São Gonçalo, município do Estado do Rio de Janeiro com estimativas referentes ao ano de 2014.

Este artigo está dividido da seguinte maneira: Seção 2 descreve os trabalhos relacionados ao tema e ao uso de SIG; Seção 3 apresenta como foram obtidos os dados de entrada do estudo de caso, bem como o modelo utilizado; Seção 4 apresenta e discute os resultados obtidos; Seção 5 sumariza as conclusões.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

2.1 EDUCAÇÃO E PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Existem diversas publicações relacionadas à alocação de recursos que envolvem o setor educacional e programação matemática. A maioria destes trabalhos visa analisar a localização das escolas ou estudar como é feito o transporte escolar.

Com relação à localização, as pesquisas visam propor novas sedes escolares de modo a minimizar a soma percorrida pelos estudantes. Neste contexto, Pizzolato e Da Silva (1997) fazem um relato de experiências envolvendo modelos de programação matemática e localização de escolas em diversos municípios do Brasil. De maneira similar, Barcelos et al. (2004) aplicam o modelo das p-medianas para a localização de novas instalações de ensino público na cidade de Vitória – ES. Pizzolato et al. (2004) fazem uma sistematização da metodologia utilizada nos trabalhos prévios. Menezes e Pizzolato (2014) abordam o grande crescimento populacional de Guaratiba, região da cidade do Rio de Janeiro e propõe soluções quanto à localização de novas sedes escolares da rede municipal de ensino para suprir tal demanda.

Alguns trabalhos abordam o roteamento do transporte escolar fornecido pelas escolas aos estudantes. Em geral a problemática envolve definir quantos veículos necessita a escola, qual atribuição de alunos para cada veículo e qual a rota que será seguida por cada veículo. Park e Kim (2010) fazem uma revisão detalhada de trabalhos deste tipo e das principais referências até o ano de 2010. Mais recentemente, Campbell et al. (2015) faz um estudo sobre este problema em um distrito do Canadá, considerando as especificidades do estudo de caso.

O presente estudo se diferencia dos citados anteriormente pelo fato de não estar interessado na localização de uma nova escola e nem no roteamento do transporte escolar. O propósito é determinar através da Programação

Linear uma melhor distribuição dos estudantes nas escolas da rede estadual na região já citada.

2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Lorena (2003) enfatiza o uso de SIG como um sistema de apoio a decisão que usam redes urbanas como suporte. Uma aplicação SIG é usada para lidar com dados geográficos em um computador.

Maller (2013) utilizou o *software* Quantum GIS para obter as coordenadas dos centroides dos setores censitários componentes do estudo, que abordou a análise da localização de escolas de ensino fundamental no distrito de Itaipava, Petrópolis – RJ. O Quantum GIS é um SIG, um Software Livre licenciado sob a “GNU – General Public License” (QGISBRASIL, 2015). Almeida (2011) afirma que “Por possuir uma interface simples e objetiva, o QGIS é útil no treinamento de novos usuários de GIS. Ademais, por ser um software livre, pode ser usado, copiado, estudado, modificado e redistribuído sem restrição”.

Alves e Silveira (2013) utilizaram SIG para gestão de voluntários de uma ONG em Porto Alegre – RS.

Oliani et al. (2012) comparam três soluções SIG, *softwares* livres: gvSIG, TerraView e Quantum GIS. O estudo se baseou na possibilidade de municípios de pequenos e médios portes utilizarem um SIG para gestão urbana. O estudo foi realizado numa região do município de Quatro Barras, situado na região metropolitana de Curitiba – PR.

Este trabalho faz a utilização de dados gerados e processados pela aplicação SIG Quantum GIS e este também foi utilizado para gerar os mapas presentes neste estudo.

3. METODOLOGIA

O modelo proposto neste trabalho visa atribuir os estudantes as escolas, maximizando o número de alunos que podem ir a pé até suas escolas, de modo

que as seguintes restrições sejam respeitadas:

1. Todo estudante deve ser alocado a exatamente uma escola.
2. A capacidade de cada escola deve ser respeitada.
3. A atribuição deve respeitar um número mínimo pré-especificado de alunos em cada escola de cada tipo de turma.

Para que modelo possa atingir seu objetivo, são necessários diversos dados de entrada. Neste contexto, esta seção visa apresentar o modo como foram obtidos os dados de entrada necessários e o modelo proposto. A Seção 3.1 descreve com detalhes como foi feita a obtenção dos dados necessários enquanto a Seção 3.2 apresenta o modelo proposto.

3.1. DADOS DE ENTRADA

Nesta seção será apresentado o modo como foram obtidos os dados do estudo de caso necessários antes do modelo ser apresentado. Tais dados são:

- Endereço de cada estudante considerado.
- Associação de cada estudante a uma turma considerada.
- Endereço de cada escola da região, bem como sua capacidade máxima de estudantes.
- Distância a pé entre cada estudante e cada escola.
- Distância máxima que um estudante pode percorrer a pé.
- Número de mínimo de alunos em cada escola de cada série considerada.

As subseções 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5 e 3.1.6 detalham os procedimentos utilizados para se obter os dados prévios.

3.1.1 ENDEREÇOS

Primeiramente, determinou-se o modo como seria obtido o endereço de estudantes a serem alocados nas instituições de ensino distribuídas pela região do município onde seria aplicado o

estudo. Mais especificamente, a região considerada foi dividida em setores censitários e foi considerado que a residência de todos os estudantes de cada setor censitário está localizada sobre o centroide do setor. Abaixo, segue uma justificativa para tal assumption.

Para fazer uma análise por território, escolheu-se usar os setores censitários discriminados no Censo Demográfico de 2010 – IBGE. O setor censitário é a menor unidade territorial, formada por área contínua, integralmente contida em área urbana ou rural, com dimensão adequada à realização da coleta de dados por um pesquisador que vai a campo por ocasião do censo. O setor constitui um conjunto de quadras, no caso de área urbana, ou uma área do município, no caso de uma área não urbanizada. O município considerado (São Gonçalo-RJ) possui 1932 setores censitários e, portanto, devido a esse grande número de unidades de setores, escolheu-se o distrito de Neves, que possui 369 setores censitários e abrange 20 bairros, como mostrado na Figura 1.

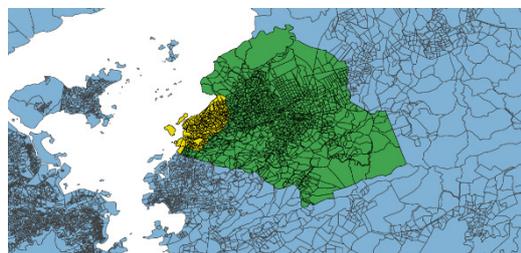


Figura 1 - Mapa de São Gonçalo – RJ (região em verde e região em amarelo), com seus setores censitários e o Distrito de Neves (região em amarelo)

Foram considerados os centroides de todos os setores censitários usados no estudo, que representam o centro geográfico do setor. Como não é possível encontrar a localização exata de cada estudante entre 15 e 17 anos de idade, que é considerada a idade ideal para o EM (foco deste estudo), segundo a legislação brasileira, assumimos que o endereço de toda a população do setor se encontra sobre o centroide. Esta maneira de se obter os endereços dos estudantes foi utilizada por grande parte dos trabalhos referenciados na seção 2.1. Para estabelecer o centroide de cada setor

cenitário, utilizou-se o SIG QGIS. A Figura 2 mostra o distrito de Neves, seus setores censitários e o centroide de cada setor.

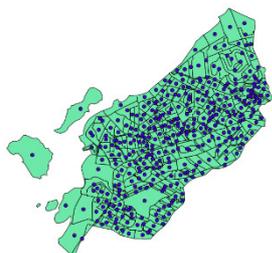


Figura 2 - Distrito de Neves, seus setores censitários e os centroides associados

3.1.2 NÚMERO DE ESTUDANTES

Quanto ao número de estudantes, a estimativa considerada da população em cada série do EM de cada setor censitário do distrito de Neves, que servirá de dado de entrada para o modelo, se baseia nos seguintes aspectos:

- idade escolar considerada pelo Conselho Nacional de Educação – BR como a ideal para o EM, que é de 15 anos para a 1ª série, 16 anos para a 2ª série e 17 anos para a 3ª série;
- estimativa populacional para 2014 no Estado do Rio de Janeiro (IBGE, 2014);
- percentual de estudantes residentes no município que se matricularam no EM de alguma escola estadual em 2014, obtidos no censo escolar do referido ano (INEP, 2014);
- índice de distorção série-idade das escolas estaduais no município de São Gonçalo em 2014 (INEP, 2014). O índice de distorção série-idade indica o percentual de alunos que estão com um atraso de dois anos ou mais em relação à idade considerada ideal para a respectiva série.

$$n_{ik} = p_{ik} \times c_{2014} \times (1 - IDSI_k) \times n_{mat} \quad (1)$$

A equação (1), tendo como referência a região de aplicação do estudo, fornece o número estimado de estudantes (n_{ik}) no centroide i da turma k em 2014, onde:

→ p_{ik} representa a quantidade de moradores do setor censitário de

centroide i em 2010 que possuem idade ideal para cursar a série k , dados obtidos através do censo demográfico 2010 (IBGE, 2014);

- c_{2014} é a estimativa de crescimento da população do estado do Rio de Janeiro para o ano de 2014, de faixa etária considerada no estudo, projetada pelo IBGE (IBGE, 2014), um aumento de aproximadamente 2,2%; isto significa que o número de pessoas de tal faixa etária crescerá 2,2% de 2010 para 2014;
- $IDSI_k$ é o índice de distorção série-idade para os alunos da série k em 2014 referente ao público em estudo. Segundo o INEP (2014) os índices foram de, aproximadamente, 46%, 37% e 30% para as 1ª, 2ª e 3ª séries, respectivamente. Neste caso, assume-se que os demais se matricularão no EJA;
- n_{mat} é o percentual de matrículas no EM nas escolas públicas estaduais em 2014 na região urbana do município de São Gonçalo, que segundo o INEP (2014) foi de 73,35% do total de matrículas no EM da mesma região.

3.1.3 ESCOLAS DA REGIÃO E SUAS CAPACIDADES

As escolas a serem consideradas são aquelas que pertencem à rede pública de ensino do Estado do Rio de Janeiro do distrito de Neves e que ofereçam vagas para o EM, descartando as que fornecem apenas ensino normal, profissional ou EJA – educação de jovens e adultos. No distrito em estudo 12 escolas correspondem ao perfil desejado. Para estimar a capacidade de cada escola quanto ao número de alunos, foi considerado o número de matrículas que cada uma delas obteve nos anos de 2010, 2011, 2012 e 2013, conforme dados dos respectivos censos escolares (INEP, 2014), visto que até a data do presente estudo os muitos dados referentes ao censo escolar 2014 (INEP, 2014) não haviam sido compilados e disponibilizados ao público.

Segundo o Artigo 211 da Constituição Federal (2010) “A União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios organizarão em regime de colaboração seus sistemas de ensino”. No mesmo artigo ainda encontra-se que “Os Municípios atuarão prioritariamente no ensino fundamental (...)” e que “Os Estados (...) atuarão prioritariamente no ensino fundamental e médio.” Portanto, para as vagas estimadas em 2014 nas escolas que oferecem outros segmentos além do EM, considerou-se na soma das matrículas as do EM e também as do ensino fundamental visto que São Gonçalo é um município de grande estrutura capaz de atender a demanda do ensino fundamental, possibilitando a priorização do EM por parte do governo do Estado do Rio de Janeiro. As vagas de creche, pré-escola e EJA não foram contabilizadas devido à adaptação geralmente feita para esses públicos, o que inviabilizaria uma mudança na logística para atendimento da demanda dos alunos do EM.

Em relação à capacidade de cada escola, vale ressaltar que são consideradas aqui neste trabalho como agregadas, ou seja, inicialmente as vagas a serem utilizadas não são discriminadas por cada série do EM. A distribuição dará o quantitativo de cada série a ser utilizado por cada escola, de acordo com os resultados do modelo.

A Tabela 1 fornece o nome e a capacidade de cada uma das doze escolas da região estudada.

Com o endereço de cada escola a ser considerada pelo modelo se obteve as coordenadas daquelas. Na Figura 3 é ilustrada a distribuição das doze escolas no distrito de Neves.

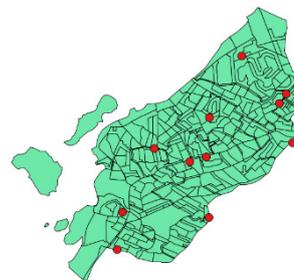


Figura 3 – Setores censitários do distrito de Neves e a localização das 12 escolas, em vermelho.

Fonte: IBGE e SEEDUC

3.1.4 DISTÂNCIA ENTRE CENTROIDES E ESCOLAS

Nesta etapa o objetivo é a obtenção da matriz de distâncias utilizada como dado de entrada para o modelo. De posse das coordenadas das 12 escolas e das coordenadas dos 369 centroides

Tabela 1 – Escolas consideradas pelo modelo e suas respectivas vagas estimadas. Fonte: SEEDUC - RJ

Identificador para o modelo	Nome da Escola	Vagas estimadas 2014
<i>Escola 1</i>	CIEP 246 Professora Adalgisa Cabral Faria	762
<i>Escola 2</i>	CE Paulino Pinheiro Baptista	921
<i>Escola 3</i>	CE Padre Manuel da Nóbrega	1420
<i>Escola 4</i>	CE Coronel Francisco Lima	745
<i>Escola 5</i>	CE Santos Dias	1382
<i>Escola 6</i>	CE Coronel João Tarcísio Bueno	478
<i>Escola 7</i>	CE Walter Orlandini	1654
<i>Escola 8</i>	CE Capitão Oswaldo Ornellas	1198
<i>Escola 9</i>	CE Nilo Peçanha	1291
<i>Escola 10</i>	CIEP 249 Pastor Waldemar Zarro	872
<i>Escola 11</i>	CIEP 052 Professora Romanda Gouveia Gonçalves	421
<i>Escola 12</i>	CIEP 413 Adão Pereira Nunes	310

envolvidos, o desafio é calcular a distância de todas as 4.428 rotas a pé (12×369). Essas distâncias irão compor a matriz de distâncias, onde nas linhas são representados os centroides e nas colunas as escolas.

Todas as 4.428 rotas foram obtidas através do Google™ *Maps*, porém tornar-se-ia inviável caso não fosse elaborado um processo automatizado para a obtenção da matriz desejada, visto o elevado número de rotas. Através de um algoritmo em código *php* obteve-se a distância (em metros) e o tempo (em minutos) de cada uma das 4.428 rotas. Tal algoritmo utilizou as coordenadas das escolas e dos centroides e através de um API disponibilizado pela Google™ retornou os dados requeridos para a confecção da matriz de distâncias.

3.1.5 DISTÂNCIA MÁXIMA A PÉ

Esta etapa é um tanto subjetiva. Para o presente estudo, considerou-se o público em questão: adolescentes entre 15 e 17 anos. Acreditando que esses possuem certa autonomia, que crianças não possuem, por exemplo, a distância $\delta = 1.200$ metros foi considerada como a distância máxima ideal que um aluno poderia percorrer a pé. Através da matriz de distâncias, foi calculada a média entre as menores e as segundas menores

distâncias de cada centroide (distância do centroide para alguma das 12 escolas) para fins de análise. O resultado da média das segundas menores distâncias foi de 1.176,85 m, o que fica próximo ao valor de δ considerado, tornando-o próximo a realidade que o estudo de caso apresenta.

3.1.6 MÍNIMO DE ALUNOS DE CADA TURMA EM CADA ESCOLA

Considerando que o estudo de caso possui 3 séries e 12 escolas, necessita-se então de 36 (3×12) dados referentes a quantidade mínima de alunos de cada turma em cada escola, uma para cada tipo de série, sendo analisado em cada escola, formando uma matriz 3×12 referente a este dado de entrada. Neste estudo de caso considerou-se os 36 valores de tal matriz iguais à 20, ou seja, em qualquer escola considerada, o número de mínimo de estudantes atribuídos de cada turma deve ser igual ou maior que 20. Tal quantidade foi estipulada de maneira subjetiva.

3.2. O MODELO PROPOSTO

O objetivo central do modelo aqui proposto é maximizar o número de alunos que podem ir a pé até suas escolas. Caso não seja possível fazer com que todos os alunos tenham este tipo de locomoção, é proposto aqui um módulo de pós-

processamento que visa minimizar a distância total percorrida pelos alunos que não vão a pé, mantendo fixo o número ótimo de alunos que podem ir a pé obtido no modelo anterior.

O modelo possui os seguintes dados de entrada e as seguintes variáveis:

Dados de entrada:

$R \rightarrow$ conjunto de centroides

$E \rightarrow$ conjunto das escolas

$S \rightarrow$ conjunto das turmas

$n_{ik} \rightarrow$ número de estudantes do centroide i da turma k

$cap_j \rightarrow$ capacidade de alunos da escola j

$d_{ij} \rightarrow$ distância a pé entre o centroide i e a escola j

$\delta \rightarrow$ distância máxima que um estudante pode percorrer a pé

$min_{kj} \rightarrow$ quantidade mínima de alunos da série k que devem ser atribuídos na escola j .

Variáveis:

$x_{ijk} \rightarrow$ número de alunos da turma k transportados da região i para a escola j

Modelo:

$$Max z = \sum_{k \in S} \sum_{i \in R} \sum_{(j \in E | d_{ij} \leq \delta)} x_{ijk} \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in R} \sum_{k \in S} x_{ijk} \leq cap_j, \forall j \in E \quad (3)$$

$$\sum_{j \in E} x_{ijk} = n_{ik}, \forall i \in R, \forall k \in S \quad (4)$$

$$\sum_{i \in R} x_{ijk} \geq min_{kj}, \forall k \in S, \forall j \in E \quad (5)$$

$$x_{ijk} \geq 0, \forall i \in R, \forall j \in E, \forall k \in S \quad (6)$$

A função objetivo (2) visa maximizar o número de alunos que vão a pé até a escola atribuída. Vale ressaltar que um estudante a uma distância d_1 e outro a uma distância d_2 das suas escolas, sendo d_1 e d_2 dentro do limite considerado ideal, são tratados de igual modo por esta função objetivo. As restrições (3) garantem que a capacidade de cada escola seja respeitada. As

restrições (4) garantem que todos os alunos serão atribuídos a alguma escola. As restrições (5) asseguram que o número mínimo de estudantes de cada turma em cada escola seja respeitado. Caso não houvesse tais restrições, o índice k , referente às turmas, poderia ser suprimido do modelo e este poderia ser executado separadamente para cada tipo de série. Já as restrições (6) mostram que as variáveis do problema devem ser reais não negativas. Nota-se que não existe a necessidade de restringir que as variáveis sejam inteiras uma vez que devido a forma como foram modeladas as restrições, as variáveis sempre assumem valores inteiros na solução ótima.

Após a execução do modelo prévio, a tendência é que os alunos que não ficaram alocados em uma escola que possam ir a pé sejam alocados em escolas não necessariamente perto uma vez que esta distância não influencia na função objetivo (2). Assim, um módulo de pós-processamento é acionado. Este módulo de pós-processamento tem como objetivo minimizar a distância total percorrida pelos alunos que não poderão ir a pé, de modo que o número ótimo de estudantes que se locomovem a pé seja mantido. Assim, o módulo de pós-processamento consiste da execução de um novo modelo que utiliza as mesmas variáveis e restrições do modelo (2) – (6). A diferença entre eles está na função objetivo e na adição de uma nova restrição. Seja z^* o número máximo de alunos que podem ir a pé, dado pelo custo da solução ótima do modelo (2) – (6). O módulo de pós-processamento segue abaixo:

$$Min \sum_{k \in S} \sum_{i \in R} \sum_{(j \in E | d_{ij} > \delta)} d_{ij} x_{ijk} \quad (7)$$

Sujeito a:

$$(3) - (6) \quad (8)$$

$$\sum_{k \in S} \sum_{i \in R} \sum_{(j \in E | d_{ij} \leq \delta)} x_{ijk} \geq z^* \quad (9)$$

A função objetivo (7) do módulo de pós-processamento visa minimizar a distância total percorrida pelos alunos que não se locomovem a pé até suas

escolas. As variáveis do novo modelo satisfazem as restrições (3) – (6) já descritas anteriormente e também satisfaz as restrições (9), que visam mostrar que o número de alunos que podem ir a pé até suas escolas é no mínimo igual ao gerado pelo modelo anterior.

3.3 LIMITAÇÕES

Existem diversas limitações que poderiam ser levantadas associadas a metodologia proposta, entretanto serão destacadas as que se consideram mais comuns a questionamentos imediatos.

O fato de o modelo possuir característica de roteamento e ser aplicado a uma determinada região, podendo desconsiderar alguma escola muito próxima à fronteira limitada pelo modelo, poderia implicar em resultados melhores ou não. De igual modo, estudantes residentes em setores não considerados no modelo, porém vizinhos à fronteira estabelecida, tenderiam a mudar a demanda por vagas, podendo provocar mudanças no resultado da distribuição. Porém, entende-se que sendo necessário fazer limitações (bairro, distrito, município, estado, por exemplo), a tendência é possuir regiões fronteiriças desconsideradas pela análise, o que não invalida o modelo, sendo aconselhável um estudo de sensibilidade nos resultados obtidos.

A não homogeneidade da qualidade de ensino entre as escolas consideradas é um fator limitante do modelo, pois gera preferências por parte dos estudantes a serem alocados, o que tende a provocar uma não aceitação da escola ao qual foi atribuído. Tal fator não é considerado pelo modelo apresentado nesse trabalho, o que não invalida os resultados obtidos pelo mesmo.

4. RESULTADOS

O estudo de caso é composto de 369 centroides, 3858 alunos, 12 escolas, 3 tipos de turma (1º, 2º e 3º anos do EM). Foi estipulado que cada aluno pode andar no máximo 1200 m a pé e que cada

escola terá no mínimo 20 alunos de cada turma. A Tabela 2 compara os resultados obtidos antes e após uso do módulo de pós-processamento.

Pelos dados apresentados pela Tabela 2, conclui-se que dos 3.858 alunos, apenas 327 não foram alocados em escolas a uma distância menor ou igual a 1.200 metros. Outro ponto importante é que antes do pós-processamento, alguns alunos foram alocados em escolas a uma distância superior a 5.700 m. Já com a utilização do pós-processamento este número se reduziu para menos de 3.700 m. Também ressalta-se a diminuição da distância média total após a segunda fase do processamento, resultando em um decréscimo de 150 metros.

Um resultado também importante é a quantidade de alunos de cada série que cada escola recebe já considerando os resultados após o pós-processamento. A Tabela 3 é composta por esses dados.

Observando os resultados da Tabela 3, nota-se que o modelo conseguiu distribuir de maneira bastante homogeneia os alunos nas escolas.

Em relação aos 327 alunos que depois da última alocação ficaram em alguma escola a mais de 1.200 m de distância, foi feita uma análise do percurso. A Tabela 4 mostra os resultados da análise feita. Para compor esta tabela foi analisada, para cada par (Centroide; Escola), a rota considerada mínima dividida em três partes: na primeira, a distância percorrida a pé até uma via com transporte público (considerada via principal); na segunda, o deslocamento de ônibus até o ponto onde o aluno deve descer e, na terceira, o percurso feito a pé do local onde desceu do ônibus até a escola. Utilizaram-se a análise da rota no Google™ *Maps* e os dados obtidos por pesquisa na internet sobre itinerários dos ônibus da referida região.

Tabela 2 - Estatísticas comparativas antes e após o módulo de pós-processamento

Estatística	Antes do pós-processamento	Após o pós-processamento
<i>Número de alunos total</i>	3858	3858
<i>Número de alunos não a pé</i>	327	327
<i>Número de alunos a pé</i>	3531	3531
<i>Distancia média total (m)</i>	1004,5	854,5
<i>Distancia média não a pé (m)</i>	3326,1	1450,9
<i>Distancia média a pé (m)</i>	789,5	799,3
<i>Maior distância (m)</i>	5714,0	3672,0

Tabela 3 – Quantidade de alunos alocados em cada escola - discriminados por série

<i>Escola</i>	Nº alunos 1ª série do EM	Nº alunos 2ª série do EM	Nº alunos 3ª série do EM	Total de Alunos
<i>1</i>	129	145	147	421
<i>2</i>	36	45	47	128
<i>3</i>	173	178	201	552
<i>4</i>	131	147	164	442
<i>5</i>	89	106	107	302
<i>6</i>	46	46	49	141
<i>7</i>	193	211	219	623
<i>8</i>	119	144	168	431
<i>9</i>	54	57	58	169
<i>10</i>	24	20	21	65
<i>11</i>	85	93	96	274
<i>12</i>	98	103	109	310

Tabela 4 – Análise pós-alocação final.

Centroide / Escola	Percurso a pé (metros)			Tempo no deslocamento (minutos)			
	Caminhada até a Via Principal	Caminhada da via principal até a escola	Total	Caminhada até a Via Principal	Deslocamento de ônibus pela via principal	Caminhada da via principal até a escola	Total
12 / 4	750	0	750	9	2	0	11
13 / 4	400	0	400	5	2	0	7
29 / 1	450	0	450	6	3	0	9
36 / 5	900	0	900	12	1	0	13
49 / 12	300	140	440	3	2	2	7
50 / 1	400	0	400	5	3	0	8
53 / 4	240	0	240	3	8	0	11
62 / 4	550	0	550	6	2	0	8
63 / 4	210	0	210	2	6	0	8
179 / 1	550	0	550	6	2	0	8
184 / 1	140	0	140	2	3	0	5
221 / 2	200	0	200	2	1	0	3
222 / 2	200	0	200	2	3	0	5
255 / 4	450	0	450	5	3	0	8
307 / 10	850	0	850	10	4	0	14
346 / 2	600	0	600	6	2	0	8
347 / 5	850	0	850	10	1	0	11
348 / 2	900	0	900	11	3	0	14
355 / 12	650	150	800	12	1	2	15
358 / 9	700	0	700	7	4	0	11
362 / 4	500	0	500	6	8	0	14
362 / 12	270	150	420	3	3	2	8
363 / 4	800	0	800	10	3	0	13

Nota-se na Tabela 4 que nenhum dos alunos considerados longe necessita caminhar mais do que 900 metros e que o tempo máximo de deslocamento total não ultrapassa os 15 minutos. Outro resultado importante está na Tabela 5, que fornece o percentual de uso das vagas de cada escola após a alocação final de estudantes, facilitando a identificação das escolas que mais influenciam na distribuição e, de igual modo, as que menos influenciam ou são pouco utilizadas.

Em relação às informações da Tabela 5 nota-se que as escolas 9 e 10 foram as que tiveram as menores taxa de ocupação, não alcançando 15%. Nota-se ainda que o percentual de utilização da capacidade da escola 12 foi de 100%. Isto sugere que se a capacidade desta escola for aumentada, os resultados podem melhorar. Tal análise de sensibilidade foi

feita, aumentando-se a capacidade da escola 12 para 400 ao invés de 310.

As Tabelas 6 e 7 comparam os dois cenários (com e sem capacidade alterada) com relação as estatísticas gerais e capacidade percentual utilizada das escolas respectivamente.

Observando as Tabelas 6 e 7, nota-se que a mudança significativa com o aumento da capacidade da escola 3 para 400 vagas foi a média das distâncias percorridas pelos alunos considerados alocados em escolas consideradas longe, que foi reduzida de 1450,9 para 1437,5. Outra pequena mudança ocorrida foi a redução do uso percentual da capacidade na escola 4 de 59% para 56%.

Um outro fator importante é tentar identificar qual o valor poderia ser economizado caso o modelo fosse adotado na prática. Por outro lado, não há como chegar a uma boa estimativa pela falta de clareza do quanto é repassado às

empresas de transporte público por tal benefício aos estudantes. Porém, considerando os duzentos dias letivos efetivos de 2014, o valor, no mesmo ano, da passagem do ônibus intermunicipal na região no valor de R\$ 3,10 (o governo não restringe o uso à ônibus municipais) e a quantidade de alunos que poderão se descolar a pé (3.531) chega-se ao valor mínimo de R\$4.378.440,00 de gastos em passagens relacionados a estes alunos. O governo do Estado do Rio de Janeiro economizaria algum percentual desse valor em 2014.

5. CONCLUSÕES

Com a necessidade de fornecer dados de entrada realistas para o modelo proposto, foi apresentada uma metodologia para obtenção da localização das escolas envolvidas no processo bem como a localização dos alunos a serem alocados. Ferramentas computacionais se fizeram necessárias para tal processo. O uso da aplicação Quantum GIS foi um dos pontos de interesse do presente trabalho, visto o crescimento da utilização de ferramentas desse tipo no planejamento urbano e, em específico, a citada, por ser um software livre.

Em relação ao modelo, através do estudo de caso, conclui-se que é possível

Tabela 5 - Percentual da capacidade utilizada em cada escola.

Escola	Percentual capacidade utilizado (%)
<i>1</i>	<i>55</i>
<i>2</i>	<i>14</i>
<i>3</i>	<i>39</i>
<i>4</i>	<i>59</i>
<i>5</i>	<i>22</i>
<i>6</i>	<i>29</i>
<i>7</i>	<i>38</i>
<i>8</i>	<i>36</i>
<i>9</i>	<i>13</i>
<i>10</i>	<i>7</i>
<i>11</i>	<i>65</i>
<i>12</i>	<i>100</i>

Tabela 6 - Estatísticas comparativas: antes e depois da mudança de capacidade.

Estatística	Capacidade não modificada		Capacidade modificada	
	Antes Pós-proc.	Após Pós-proc.	Antes Pós-proc.	Após pós-proc.
<i>Número de alunos total</i>	<i>3858</i>	<i>3858</i>	<i>3858</i>	<i>3858</i>
<i>Número de alunos não a pé</i>	<i>327</i>	<i>327</i>	<i>327</i>	<i>327</i>
<i>Número de alunos a pé</i>	<i>3531</i>	<i>3531</i>	<i>3531</i>	<i>3531</i>
<i>Distancia media total (m)</i>	<i>1004,5</i>	<i>854,5</i>	<i>1005,3</i>	<i>853,4</i>
<i>Distancia media não a pé (m)</i>	<i>3326,1</i>	<i>1450,9</i>	<i>3326,1</i>	<i>1437,5</i>
<i>Distancia media a pé (m)</i>	<i>789,5</i>	<i>799,3</i>	<i>790,4</i>	<i>799,3</i>
<i>Maior distancia (m)</i>	<i>5714,0</i>	<i>3672,0</i>	<i>5714,0</i>	<i>3672,0</i>

Tabela 7 - Percentual de utilização antes e depois da mudança de capacidade.

Escola	Percentual da capacidade utilizado (%)	
	Capacidade não modificada	Capacidade modificada
1	55	55
2	14	14
3	39	39
4	59	56
5	22	20
6	29	29
7	38	38
8	36	36
9	13	13
10	14	14
11	34	34
12	74	74

otimizar a distribuição requerida pelo presente trabalho. Mesmo considerando as limitações apresentadas, essa otimização pôde obter resultados significativos para a população em questão, maximizando o número de alunos que podem ir a pé até suas escolas e, em seguida, redistribuindo de maneira otimizada os demais alunos, fornecendo também dados importantes como a taxa de ocupação de cada escola depois da distribuição, possibilitando uma análise quanto a direcionamento de recursos públicos para a melhoria da rede escolar.

A respeito de trabalhos futuros alguns caminhos podem ser seguidos. Um deles é a consideração de mais séries, uma vez que algumas escolas podem oferecer vagas para segmentos além do EM, e também a utilização da capacidade de cada escola como variável, pois mostraria ao gestor quais escolas poderiam ser ampliadas com intuito de se garantir uma melhor alocação. Outro viés de análise pode ser o de localização de uma ou mais novas escolas na região considerada ao invés de somente distribuição destes alunos nas escolas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. 2011. Análise Espacial de dados com o Quantum Gis: exercícios realizados durante tópico especial ofertado pelo programa de Pós-

Graduação em Geografia da UFSC. *Revista Eletrônica de Geografia*, 3, 8.

ALVES, P.D. & Silveira, R. 2013. Utilização de um sistema de informação geográfica como apoio a gestão do voluntariado. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 2013 Foz do Iguaçu, Brasil.

BARCELOS, F.B., PIZZOLATO, IN.D. & LORENA, L.A.N. 2004. Localização de escolas do ensino fundamental com modelos capacitado e não-capacitado: caso de Vitória/ES. *Pesquisa Operacional*, 24, 1, 133-149.

CAMPBELL, J.F., NORTH, J.W. & ELLEGOOD, W.A. 2015. Modeling Mixed Load School Bus Routing. In: SEBASTIAN, H.J., KAMINSKY, P. & MULLER, T. *Quantitative Approaches in Logistics and Supply Chain Management*. Springer, 3-30.

CONSTITUIÇÃO FEDERAL. Constituição da República Federativa do Brasil, Artigo 211, 2010. Disponível em: <http://www.senado.gov.br/legislacao/const/con1988/CON1988_13.07.2010/art_211_.shtm>. Acesso em 15 junho 2015.

IBGE, Censo demográfico. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>>. Acesso em 3 de Novembro 2014.

_____. Sinopse por setores, Censo demográfico 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/>>. Acesso em Novembro 2014.

_____. Projeção da População do Brasil por sexo e idade: 2000-2060. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2013/default_tab.shtm>. Acesso em Janeiro 2015.

INEP, Censo Escolar. 2014. Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/basica-censo>>. Acesso em 15 junho 2015.

LORENA, L.A.N. 2003. Análise Espacial de Redes com Aplicações em Sistemas em Informações Geográficas. *Revista Produção Online. Florianópolis, SC*, 3, 2.

MALLER, R. 2013. *Avaliação da Localização de Escolas Públicas no Distrito de Itaipava/RJ*. Monografia. Universidade Católica de Petrópolis.

MENEZES, R.C. & PIZZOLATO, N.D. 2014. Locating public schools in fast expanding areas: application of the capacitated p-median and maximal covering location models. *Pesquisa Operacional*, 34, 2, 301-317.

OLIANI et al. 2012. Utilização de softwares livres de geoprocessamento para gestão urbana em municípios de pequeno e médio porte. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2012 Recife, Brasil.

PARK, J. & KIM, B. 2010. The school bus routing problem: A review. *European Journal of operational research*, 202, 2, 311-319.

PIZZOLATO, N.D. & DA SILVA, H.B.F. 1997. The location of public schools: evaluation of practical experiences. *International Transactions in Operational Research*, 4, 1, 13-22.

PIZZOLATO, N.D, BARCELOS, F.B. & LORENA, L.A.N. 2004. School location methodology in urban areas of developing countries. *International Transactions in Operational Research*, 11, 6, 667-681.

QGISBRASIL, Comunidade de usuários QGIS Brasil, 2015. Disponível em: <<http://qgisbrasil.org/>>. Acesso em 15 junho 2015.

SALA DE IMPRENSA IBM®. Estudo da IBM traz radiografia do trânsito em 20 metrópoles mundiais. Disponível em: <<https://www-03.ibm.com/press/br/pt/pressrelease/32027.wss#release>>. Acesso em 14 junho 2015.

SEEDUC. Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/seeduc>>. Último acesso em: 10/12/2014.