

Modelo de Flujo de Costo Mínimo para la Asignación de Estudiantes a Instituciones Educativas en el Sistema de Educación Público Ecuatoriano

Gutiérrez S.*; Salazar F.*; Nolivos K.*

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ciencias, Quito, Ecuador
e-mail: sandra.gutierrez@epn.edu.ec, fernanda.salazar@epn.edu.ec, karen.nolivos@est.epn.edu.ec

Resumen: En este trabajo se considera el problema de encontrar una asignación óptima de cupos para los estudiantes de Educación General Básica en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Este es un problema que año tras año llama la atención de los medios, y de la sociedad en general, por los diferentes métodos que se aplican y la inconformidad de los estudiantes y padres de familia. Con base en los requerimientos de las autoridades de educación, se han generado diferentes escenarios y varios modelos de flujo de costo mínimo que permiten resolver exitosamente el problema. En estos modelos prima el criterio de minimizar la movilidad global de los estudiantes que corresponde al nuevo modelo de gestión pública que se desea aplicar en el país. Adicionalmente, se proponen dos modelos en los que se incluyen los criterios de rendimiento académico y preferencia de los estudiantes, por considerar que se ajustan a la realidad actual. El análisis incluye el cálculo de la oferta y la demanda de cupos, el planteamiento de los modelos de optimización y su solución a través de software especializado.

Palabras clave: asignación, flujo de costo mínimo, algoritmos, optimización.

Abstract: Nowadays, the Ecuadorian government has established that people should receive all basic services, including education, in its territory of residence, called District. Therefore, in this work, the goal is to find an optimal assignment of students to public educational institutions in the Metropolitan District of Quito. For the described problem, we have generated minimum cost flow models under three scenarios. In the first one the resulting assignment minimizes the total mobilization of students, as required by the authorities. The second model includes a penalization when a student moves between Districts. Finally, in the third scenario we include a measure of the "social resistance" to the first scenario, which includes criteria such as academic performance of students and their preference to specific institutions. The analysis embraces the supply/demand estimation, the generation of optimization models and their solution through specialized software.

Keywords: assignment, minimum cost flow, algorithms, optimization.

1. INTRODUCCION

De manera general, el sector público ha sido un terreno fértil para la aplicación de técnicas de optimización. Específicamente, en el sector educativo, surgen muchos problemas cuya toma de decisiones pueden ser asistidas por modelos de programación matemática, como por ejemplo, modelos de flujo de costo mínimo, asignación, localización de facilidades, entre otros. Los problemas típicos que han sido resueltos con herramientas de optimización han sido la elaboración de horarios, tanto de alumnos como de profesores, la localización de establecimientos educativos para satisfacer la demanda de la población, entre otros. En América Latina, se han realizado varios estudios referentes a

la localización y número adecuado de escuelas utilizando modelos de p-medianas y de máxima cobertura, entre los cuales podemos citar a los trabajos realizados en Brazil por Pizzolato y Fraga [7] y Pizzolato, Broseghini y Nogueira [8]. Por otro lado, en Chile, podemos resaltar el estudio realizado por Gac, Martínez y Weintraub [3], en el cual se toma en cuenta en la función objetivo el beneficio social del sistema educativo, al asignar diferentes tipos de escuelas a zonas y simultáneamente asignar estudiantes clasificados por categoría socio económica.

En la literatura, una de las primeras aplicaciones para asignar estudiantes a escuelas respetando criterios de balance racial, ha sido realizada por Belford y Ratliff [1], utilizando técnicas de modelos de flujos de costo mínimo. Posteriormente han surgido otros estudios para asignar estudiantes a escuelas, como por ejemplo los realizados por McKeown y Workman [5] y Elizondo [2], en el primer trabajo se minimiza la distancia total de transporte de los estudiantes a sus escuelas, el cual fue analizado agrupando estudiantes de acuerdo a su ubicación geográfica y utilizando únicamente las escuelas ya

Artículo recibido el 28 de noviembre de 2014; revisado ...
Esta obra fue financiada por la Escuela Politécnica Nacional en el marco del Proyecto Semilla PIS-12-13.
Autor para correspondencia: fernanda.salazar@epn.edu.ec, 0994249625, EPN Edif. Administrativo 8vo piso.

existentes bajo el enfoque de k-centros. En el segundo, se analiza el caso del Distrito Escolar Independiente de Houston, se realiza la asignación individual de estudiantes, minimizando la distancia total recorrida y se enfoca en la evaluación de heurísticas computacionales para resolver el problema de asignación a gran escala.

En la nueva constitución ecuatoriana del año 2008, se incluyó el concepto de *sumakkawsay* traducido como Buen Vivir, el cual implica “mejorar la calidad de vida de la población, desarrollar sus capacidades y potencialidades; contar con un sistema económico que promueva la igualdad a través de la re-distribución social y territorial de los beneficios del desarrollo; impulsar la participación efectiva de la ciudadanía en soberanía nacional, promover la integración latinoamericana; y proteger y promover la diversidad cultural” (Art. 276). Una consecuencia directa de este artículo ha sido una nueva planificación territorial, en la cual se considera que el DMQ está conformado por distritos, los cuales a la vez están formados por circuitos. De acuerdo con esta nueva planificación territorial, las personas deben recibir todos los servicios básicos (salud y educación especialmente) en su territorio de residencia. Esto ha ocasionado incluso más molestias en los usuarios del sistema público educativo, puesto que la calidad de los centros educativos no es homogénea ni en infraestructura ni en nivel académico.

En este trabajo, se presenta la solución para el problema de asignación de cupos para estudiantes del sistema público de Educación General Básica, tomando en cuenta el nuevo modelo de gestión propuesto por el Ministerio de Educación, en el cual los estudiantes no eligen directamente el centro educativo al cual quieren asistir, sino que esta asignación se realiza de manera directa desde la Subsecretaría de educación del Distrito Metropolitano de Quito (SEDMQ), para promover el cumplimiento de la planificación territorial, es decir se desea que cada estudiante permanezca en su circuito territorial educativo y de no existir instituciones educativas al momento en su circuito, entonces el estudiante permanezca al menos en su distrito, sin embargo, debido a que la demanda es mayor que la oferta, esta última condición puede violarse en caso de no existir más plazas en el distrito de residencia del estudiante. Cabe resaltar, que un aspecto que no hemos encontrado en otros artículos, es la evaluación de la “resistencia social” al asignar a los estudiantes, sin darles oportunidad a elegir su centro educativo. Por este motivo, se ha incluido un escenario en el que se analiza la inclusión en la función objetivo de la preferencia de cada estudiante por un determinado centro educativo, ponderado por la nota promedio obtenida en el año inmediatamente anterior, para poder satisfacer de mejor manera los requerimientos de estudiantes con mayor rendimiento académico.

A continuación, en la sección 2 describimos el modelo de flujo de costo mínimo propuesto y las variantes consideradas para proporcionar varios criterios de asignación a los tomadores de decisiones. En la sección 3 ponemos a consideración del lector los resultados de asignación obtenidos para los diferentes escenarios mediante el algoritmo primal-dual del simplex para redes implementado en MCF[4]. Finalmente, en la cuarta sección resaltamos las principales conclusiones y aportes de este artículo.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1. Métodos

En esta investigación tomamos como caso de estudio el problema de encontrar una asignación óptima de cupos para estudiantes que desean ingresar a octavo año de Educación General Básica (EGB) en el DMQ por ser el de mayor interés; sin embargo, los resultados pueden replicarse para cualquier nivel de EGB. El problema se resuelve mediante un modelo de flujo de costo mínimo en el que se respetan las capacidades de las instituciones educativas y en el que cada estudiante se asigna a una única institución, o a su vez se indica que no existe un cupo para ese estudiante. La asignación se calcula para cuatro diferentes escenarios. En el primero la asignación requerida es aquella que minimice la movilización total de los estudiantes hacia las instituciones educativas, en el segundo, penalizamos el hecho de moverse entre distritos aumentando el valor de la distancia real en un treinta por ciento; el tercer escenario intenta dar una alternativa adicional a los tomadores de decisiones en donde se incluyen criterios como el rendimiento académico de los estudiantes y su preferencia en cuanto a instituciones educativas, si bien estos criterios no están dentro del nuevo modelo de gestión, son cercanos a la realidad social del Distrito Metropolitano de Quito. Dentro de este último escenario, consideramos el caso de maximizar las preferencias de los estudiantes y también el caso de incluir un factor tanto de movilidad como de preferencias en la función objetivo.

El DMQ se divide en 9 distritos los cuales se subdividen en 45 circuitos y estos últimos se dividen en 65 parroquias, como se muestra en la figura de abajo.

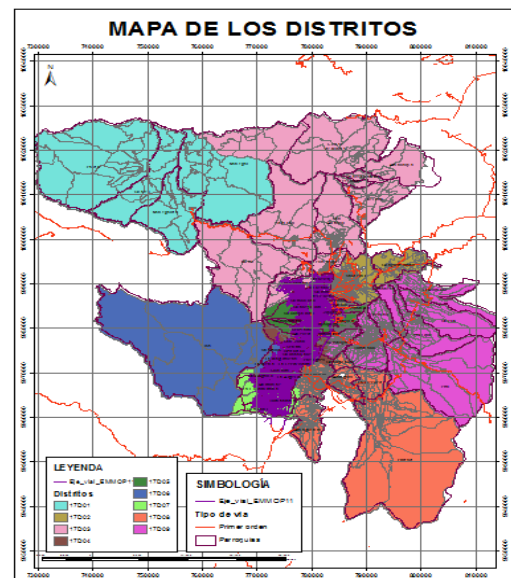


Figura 1: Mapa de los distritos del DMQ.

Para la formulación del modelo de flujo de costo mínimo es indispensable contar con datos sobre la oferta y la demanda de cupos para octavo año de EGB. En esta aplicación, la información sobre la demanda, el número de instituciones educativas, su oferta y su ubicación se generó de acuerdo al Archivo Maestro de Instituciones Educativas del Ecuador “AMIE 2011-2012 FIN”[9]; como se detalla a continuación.

Estudio de la demanda: Para estimar la demanda se utilizó el archivo “AMIE 2011-2012 FIN” en la información que concierne a estudiantes que están cursando actualmente séptimo año de EGB en instituciones de sostenimiento fiscal, ya que son quienes automáticamente necesitan un cupo para octavo año, a esta cantidad se le sumó un diez por ciento que pretende incluir factores como cambios de domicilio, migración, cambios del sistema de educación privado al sector público, entre otros; este factor fue sugerido por las autoridades de la SEDMQ. Los datos incluyen el número de estudiantes por institución en séptimo año de EGB, por lo que fácilmente se pueden tener datos agregados a nivel de parroquia, circuito y distrito. Para esta aplicación se encontró que la demanda es de 31572 estudiantes. En los diferentes escenarios que planteamos más adelante se necesita conocer la ubicación geográfica de cada uno de ellos; lamentablemente, no se tienen registros sobre este particular, por lo que se asume que los estudiantes de séptimo año de EGB que estudian actualmente en una determinada parroquia pertenecen o residen en esa parroquia.

Estudio de la oferta: Del archivo “AMIE 2011-2012 FIN” se determinó que el número de instituciones de sostenimiento fiscal en el Distrito Metropolitano de Quito es 212. Se tiene además su ubicación hasta el nivel de parroquias. La capacidad de cada institución, para octavo año de EGB, no se encuentra explícita por lo que fue estimada como el número de estudiantes que se encuentran cursando actualmente ese nivel.

Los dos elementos que acabamos de describir son comunes para todos los modelos desarrollados en este trabajo. A continuación presentamos los diferentes escenarios que resultan del planteamiento de diferentes funciones objetivo.

Escenario 1: El criterio de asignación solicitado por las autoridades de la SEDMQ, fue que se calcule la asignación de estudiantes de acuerdo a su ubicación geográfica, de manera que, en lo posible, los estudiantes permanezcan dentro del circuito en el que residen. Este criterio apareció recientemente en el llamado nuevo modelo de gestión pública [6], para satisfacerlo es indispensable contar con datos sobre la distancia entre el lugar de residencia de los estudiantes y el lugar en el que está ubicada cada institución. En nuestro modelo tales distancias se calcularon, a nivel de parroquias, usando mapas proporcionados por la SEDMQ y el programa ARCGIS 10[10]. En primer lugar se definió el centroide de cada parroquia de acuerdo a su oferta, determinado por la agrupación de las instituciones educativas públicas disponibles en los mapas proporcionados. Luego, el cálculo de las distancias interparroquiales, aproximadas en kilómetros (de centroide a centroide), se lo hizo mediante el uso de la herramienta Measure disponible en el programa ARCGIS 10, siguiendo primordialmente las vías de primer orden especificadas en los mapas. Debemos mencionar que se desconoce si por dichas rutas existe transporte público y si serán las verdaderas rutas de movilización de los estudiantes, por lo que la distancia real podría variar considerablemente. El modelo de optimización resultante es el siguiente:

$$(P1) \left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} \\ \text{sujeto a} \\ \sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (1) \\ \sum_{i=1}^I x_{ij} = c_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (2) \\ x_{ij} \in \{0,1\} \end{array} \right.$$

En donde: I es el número de estudiantes (demanda), J es el número de instituciones, d_{ij} es la distancia entre la parroquia del estudiante i y la parroquia de la institución j y c_j es la capacidad de la institución j . Las variables de decisión x_{ij} son variables binarias que toman el valor de 1 si el estudiante i es asignado a la institución j y 0 en caso contrario.

Validez del modelo: En este modelo, la restricción (1) garantiza que cada estudiante es asignado a una única institución, mientras que la restricción (2) garantiza que se respetará la capacidad de cada institución. Las dos restricciones son de tipo igualdad debido a que se considera un modelo balanceado, esto es, se asume que la oferta es igual a la demanda. Como es bien conocido, en caso de no existir tal balance, se procede a crear un nodo artificial con el valor apropiado de oferta o demanda, según el caso. La función objetivo permite encontrar la asignación de estudiantes que hace que la movilidad global sea mínima, por tanto resolverá el problema de estudio, indicando además el faltante o el sobrante de cupos en cada distrito.

Escenario 2: Aquí se considera explícitamente la condición que, en lo posible, los estudiantes permanezcan en su circuito o, al menos, en su propio distrito. Con el fin de incluir esta condición en la función objetivo, se aumentó una penalización del treinta por ciento en el valor de la distancia d_{ij} , siempre que i y j se encuentren en diferentes distritos, en caso contrario se mantiene el valor de la distancia interparroquial original.

Escenario 3: En este escenario se incluyen dos criterios adicionales al de minimizar la movilidad de los estudiantes, estos criterios son el rendimiento académico y la preferencia del estudiantes por ciertos centros educativos, que obedecen a lo que sucede en la realidad y que pueden servir para analizar el grado de aceptación o de resistencia social que una determinada asignación causa en los estudiantes y en los padres de familia.

En una primera modificación al modelo base, que llamaremos Caso A, proponemos que los estudiantes de más alto rendimiento tengan mayor opción de ser asignados a las instituciones de su preferencia, esto es, encontramos la asignación que maximiza la preferencia global de los estudiantes, lo cual sería equivalente a minimizar la resistencia social. Suponemos que cada estudiante puede señalar tres instituciones de su preferencia, a ellas les asignamos un factor f_{ij} de 0.4, 0.15 y 0.82 respectivamente, mientras que a las 209 instituciones restantes se les asigna un

factor de 0.002. El valor de preferencia p_{ij} que se usa como coeficiente en la función objetivo corresponde al producto del factor de preferencia por la nota promedio del estudiante en séptimo año de EGB, n_i , es decir, $p_{ij} = f_{ij}n_i$. El modelo, al igual que en el problema P1 incluye las restricciones (1) y (2) con la siguiente función objetivo:

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

Conscientes de que la asignación anterior no toma en cuenta la movilización de los estudiantes, presentamos una segunda modificación, que llamaremos Caso B, cuya función objetivo combina tanto la movilidad como las preferencias, dando mayor peso a la movilidad. Con esto se pretende aplicar el criterio de movilidad de una forma menos estricta, tomando en consideración la opinión de los estudiantes y de los padres de familia. La nueva modificación considera las restricciones (1) y (2) del modelo P1 con la siguiente función objetivo:

$$\min 0.7 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} - 0.3 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

Solución: Los modelos de flujo de costo mínimo de los dos primeros escenarios tienen una red asociada con 31754 nodos, que corresponde a la suma de 31542 estudiantes más 212 instituciones, y 6'686.904 arcos, que corresponden a las variables x_{ij} . Ambos modelos de flujo de costo mínimo se resolvieron usando el solver especializado mcf-1.3, [4] desarrollado en el ZuseInstituteBerlin, ZIB [11], en este solver se encuentra implementado un algoritmo primal-dual del simplex en redes. Para los escenarios 1 y 2, la solución óptima se encuentra en 31 segundos. En los modelos del escenario 3 se hicieron las debidas transformaciones para obtener un modelo de flujo de costo mínimo estándar, y se aplicó el solver mencionado anteriormente.

En el presente trabajo, todos los archivos de entrada fueron generados a través de programas escritos en lenguaje C++ mientras que los resultados finales se obtuvieron tomando los archivos de salida del mcf-1.3 y aplicando programas desarrollados con Microsoft Visual Basic.

2.2 Material

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un computador con sistema operativo Windows 7 Professional, con procesador Intel Core i5-2300 de 2.8 GHz y memoria RAM de 4GB.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

En primer lugar, en la tabla 1, se presenta la información de oferta y demanda de cada uno de los distritos del DMQ con la que se construyen los modelos de optimización. No se incluye el Distrito 1 porque pertenece a otro régimen escolar.

Tabla 1. Oferta y Demanda educativa por distrito.

Districtos	Demanda	Oferta
D2	2516	2082
D3	3952	3607
D4	4551	3934
D5	4456	5744
D6	7716	7963
D7	3451	1915
D8	2091	1136
D9	2839	2418
TOTAL	31572	28799

A continuación presentamos los resultados de las asignaciones de estudiantes al octavo año de EGB en el DMQ de acuerdo a los diferentes escenarios. Para el escenario uno y para cada distrito, la tabla 2 muestra la cantidad de estudiantes que son asignados a instituciones de su propio distrito, tanto en número como en porcentaje, los que son asignados a un distrito diferente, el total de estudiantes asignados en el distrito y cuántos cupos faltan en ese distrito para poder satisfacer su demanda, esta última cantidad también puede ser vista como el número de estudiantes de un distrito que se queda sin cupo. La tabla 3 presenta la misma información resumida a nivel de circuito.

Tabla 2. Asignación con distancias originales por distrito.

Districtos	Estudiantes que permanecen en su distrito		Estudiantes que se movilizan a otros distritos		Estudiantes asignados	Faltante
	Número	%	Número	%		
D2	2082	83%	415	16%	2497	19
D3	3452	87%	385	10%	3837	115
D4	3608	79%	943	21%	4551	0
D5	4456	100%	0	0%	4456	0
D6	7370	96%	326	4%	7696	20
D7	1915	55%	352	10%	2267	1184
D8	1136	54%	0	0%	1136	955
D9	2298	81%	61	2%	2359	480
TOTAL	26317	83%	2482	8%	28799	2773

Tabla 3. Asignación con distancias originales por circuito.

Distritos	Estudiantes que permanecen en su circuito		Estudiantes que se movilizan a otros circuitos		Estudiantes asignados	Faltante
D2	1980	95%	517	25%	2497	19
D3	3128	87%	709	20%	3837	115
D4	3318	84%	1233	31%	4551	0
D5	3688	64%	768	13%	4456	0
D6	6567	82%	1129	14%	7696	20
D7	1909	100%	358	19%	2267	1184
D8	1098	97%	38	3%	1136	955
D9	2121	88%	238	10%	2359	480
TOTAL	23809	75%	4990	16%	28799	2773

Para el segundo escenario, en donde se penaliza el hecho de que un estudiante sea asignado a una institución de un distrito diferente al suyo, las tablas 4 y 5 presentan los resultados de la asignación a nivel de distrito y de circuito, respectivamente.

Tabla 4. Asignación con distancias penalizadas por distrito.

Distritos	Estudiantes que permanecen en su distrito		Estudiantes que se movilizan a otros distritos		Estudiantes asignados	Faltante
D2	2068	82%	350	14%	2418	98
D3	3454	87%	385	10%	3839	113
D4	3934	86%	617	14%	4551	0
D5	4456	100%	0	0%	4456	0
D6	7550	98%	146	2%	7696	20
D7	1915	55%	413	12%	2328	1123
D8	1136	54%	0	0%	1136	955
D9	2375	84%	0	0%	2375	464
TOTAL	26888	85%	1911	6%	28799	2773

Tabla 5. Asignación con distancias penalizadas por circuito.

Distritos	Estudiantes que permanecen en su circuito		Estudiantes que se movilizan a otros circuitos		Estudiantes asignados	Faltante
D2	1966	94%	452	22%	2418	98
D3	3128	87%	711	20%	3839	113
D4	3028	77%	1523	39%	4551	0
D5	3585	62%	871	15%	4456	0
D6	6387	80%	1309	16%	7696	20
D7	1909	100%	419	22%	2328	1123
D8	1098	97%	38	3%	1136	955
D9	2120	88%	255	11%	2375	464
TOTAL	23221	74%	5578	17%	28799	2773

En el tercer escenario, Caso A, donde se maximizan las preferencias de los estudiantes sin consideración alguna sobre su movilización, la asignación resultante a nivel de distrito y de circuito se presenta en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Asignación por preferencias y rendimiento académico, por distrito.

Distrito	Demanda	Oferta	Estudiantes que permanecen en su distrito		Estudiantes que se movilizan a otros distritos		Estudiantes asignados
D2	2516	2082	174	7%	2133	85%	2307
D3	3952	3607	469	12%	3133	79%	3602
D4	4551	3934	582	13%	3587	79%	4169
D5	4456	5744	792	18%	3287	74%	4079
D6	7716	7963	1927	25%	5132	67%	7059
D7	3451	1915	184	5%	2944	85%	3128
D8	2091	1136	68	3%	1818	87%	1886
D9	2839	2418	209	7%	2360	83%	2569
TOTAL	31572	28799	4405	13,95%	24394	77,26%	28799

Tabla 7. Asignación por preferencias y rendimiento académico, por circuito.

Distrito	Demanda	Oferta	Estudiantes que permanecen en su circuito		Estudiantes que se movilizan a circuitos vecinos		Estudiantes asignados
D2	2516	2082	51	2%	2256	90%	2307
D3	3952	3607	63	2%	3539	90%	3602
D4	4551	3934	129	3%	4040	89%	4169
D5	4456	5744	135	3%	3944	89%	4079
D6	7716	7963	277	4%	6782	88%	7059
D7	3451	1915	36	1%	3092	90%	3128
D8	2091	1136	16	1%	1870	89%	1886
D9	2839	2418	43	2%	2526	89%	2569
TOTAL	31572	28799	750	2%	28049	89%	28799

Además, en la siguiente tabla se muestra la cantidad de estudiantes que fueron asignados a su primera, segunda, tercera o ninguna preferencia, con el modelo del Caso A y con el modelo del escenario 1.

Tabla 8. Asignación por preferencias

Escenario 1									
Preferencia 1		Preferencia 2		Preferencia 3		Otras		Total	
437	0.014%	173	0.005%	50	0.01%	30912	98%	31572	100%
Escenario 3. Caso A.									
4200	13%	11322	36%	10773	34%	5277	17%	31572	100%

Las tablas 9 y 10 muestran los resultados obtenidos dentro del mismo escenario 3 pero en el Caso B, considerando simultáneamente criterios de preferencias y movilidad de los estudiantes, a nivel distrital y circuital respectivamente.

Tabla 9. Asignación de estudiantes por movilidad y preferencia, por distrito.

Distrito	Demanda	Oferta	Estudiantes que permanecen en su distrito		Estudiantes que se movilizan a otros distritos		Estudiantes asignados
D2	2516	2082	2082	83%	415	16%	2497
D3	3952	3607	3452	87%	385	10%	3837
D4	4551	3934	3701	81%	850	19%	4551
D5	4456	5744	4456	100%	0	0%	4456
D6	7716	7963	7431	96%	265	3%	7696
D7	3451	1915	1915	55%	349	10%	2264
D8	2091	1136	1136	54%	0	0%	1136
D9	2839	2418	2298	81%	64	2%	2362
TOTAL	31572	28799	26471	84%	2328	7%	28799

Tabla 10. Asignación de estudiantes por movilidad y preferencia, por circuito.

Distrito	Demanda	Oferta	Estudiantes que permanecen en su circuito		Estudiantes que se movilizan a circuitos vecinos		Estudiantes asignados
D2	2516	2082	1980	79%	517	21%	2497
D3	3952	3607	3154	80%	683	17%	3837
D4	4551	3934	3231	71%	1320	29%	4551
D5	4456	5744	3757	84%	699	16%	4456
D6	7716	7963	6500	84%	1196	16%	7696
D7	3451	1915	1909	55%	355	10%	2264
D8	2091	1136	1098	53%	38	2%	1136
D9	2839	2418	2121	75%	241	8%	2362
TOTAL	31572	28799	23750	75%	5049	16%	28799

Finalmente, en la tabla 11, presentamos el resumen de la satisfacción de las preferencias de los estudiantes con la asignación que se obtiene aplicando el modelo del Caso B.

Tabla 11. Asignación por preferencias

Escenario 1									
Preferencia 1		Preferencia 2		Preferencia 3		Otras		Total	
437	0.014%	173	0.005%	50	0.01%	30912	98%	31572	100%
Escenario 3. Caso B.									
2400	8%	1547	5%	964	3%	26661	84%	31572	100%

4. CONCLUSIONES

El principal aporte de este trabajo es proporcionar una herramienta computacional técnica y eficiente a los tomadores de decisiones, para que aplicándose en un futuro próximo evite conflictos resultantes de manejar criterios empíricos para la asignación de estudiantes a instituciones educativas.

Se puede concluir que la movilidad es necesaria para poder satisfacer la demanda de cupos, aún si ésta es penalizada. Esto se refleja en el hecho de que el porcentaje de estudiantes que permanece en su distrito aumenta solamente del 83% en el escenario 1 al 85% en el escenario 2, con el efecto de que

la movilidad entre circuitos aumenta ligeramente del 16 al 17%. Se puede observar que no se logrará una mejora radical en cuanto no se aumente la oferta en determinados circuitos. Desde el punto de vista práctico, destacamos que la asignación óptima se calcula en 31 segundos, esto aumenta considerablemente su valor pues, con los procedimientos actuales, la asignación de cupos tarda varias semanas en calcularse.

Al maximizar la preferencia de los estudiantes de acuerdo a su rendimiento académico, se encuentra que la movilidad es muy alta tanto a nivel de distrito como de circuito, 79 y 89 % respectivamente, esto es coherente con la realidad pues, en general, los estudiantes no ven como algo negativo el movilizarse largas distancias a cambio de estudiar en la

institución de su preferencia. Con este modelo la resistencia social sería baja, dado que un 83% de estudiantes son asignados a alguna de sus preferencias.

Si se trata de equilibrar los criterios de asignación, combinando los criterios de minimizar la movilidad total y de satisfacer las preferencias de los estudiantes, se puede observar que únicamente se movilizan entre distritos un 7% de estudiantes y entre circuitos un 16%, pero la resistencia social podría seguir presente debido a que el 84% de estudiantes serían asignados a un plantel por el cual no manifestó ninguna afinidad. Sin embargo, esta resistencia es menor en comparación al modelo sin preferencias, en el que se obtiene una resistencia del 98%. Podemos concluir, que encontrar un equilibrio puede ser muy difícil siendo necesario calibrar adecuadamente las ponderaciones de acuerdo a datos reales.

Para los modelos propuestos y los diferentes escenarios analizados, los datos de entrada son la oferta, la demanda y las distancias entre los estudiantes y los respectivos centros educativos, al igual que la preferencia de los estudiantes hacia ciertos centros educativos y su nota promedio del año inmediatamente anterior. Sin embargo, dicha información no existe de manera fidedigna para todos los distritos. Cada uno de los procedimientos utilizados para la estimación de tal información podría causar que los resultados no sean precisos. Por tanto, el trabajo que pueda dedicarse a su obtención se reflejaría directa y positivamente en una asignación más cercana a la realidad.

REFERENCIAS

- [1] Belford, P.C y Ratliff, H.D. (1972). A network flow model for racially balancing schools. *Operations Research* 20(3), 619-628.
- [2] Elizondo R. (1993). Solving very large scale school/student assignment problems. Technical Report TR93-48. Rice University, revisado en <http://www.caam.rice.edu/caam/trs/93/TR93-48.pdf>.
- [3] Gac, I., Martínez, F. y Weintraub, A. (2009). A deterministic linear optimization model for allocating schools to zones. *Journal of the Operational Research Society*, 60, 895-905.
- [4] Loebel, A. (2000). Mcf 1.3.A network simplex implementation. ZuseInstituteBerlin. Revisado en http://typo.zib.de/opt-long_projects/Software/Mcf/.
- [5] McKeown, P. y Workman, B. (1976). A study in using linear programming to assign students to schools. *Interfaces*, 6(14), 96-101.
- [6] Ministerio de Educación del Ecuador, <http://educacion.gob.ec/reorganizacion-territorial/>. Recuperado el 30 de mayo de 2013.
- [7] Pizzolato, N.D. y Fraga da Silva, H. B (1997). The location of public schools: Evaluation of practical experiences. *International Transactions in Operations Research*, 4(1), 13-22.
- [8] Pizzolato, N.D., Broseghini, F. y Nogueira, L. (2004). School location methodology in urban areas of developing countries. *International Transactions in Operations Research*, 11(6), 667-681.
- [9] Subsecretaría de Educación del Distrito Metropolitano de Quito, comunicación personal.
- [10] <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis10>. Recuperado el 30 de mayo de 2013.
- [11] <http://www.zib.de>. Recuperado el 30 de mayo de 2013.