

Prototipo de Sistema de Información para el Usuario del Transporte Público Colectivo Urbano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Querétaro¹

Dr. Arturo González Gutiérrez², Dr. Teofilo F. Gonzalez³,
M.C. Fidel González Gutiérrez⁴, M.C. Guillermo Díaz Delgado⁵, y M.C. Ma. Elena Vázquez Huerta⁶

Resumen—La falta de información precisa acerca de itinerarios, tiempos de recorrido, horarios de servicio y paradas oficiales de ascenso/descenso de pasajeros de las rutas que conforman el Sistema de Transporte Público Colectivo Urbano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Querétaro (STPCU-ZMQ) ocasiona pérdida de tiempo para los usuarios de este servicio en su desplazamiento de un lugar a otro dentro de la ciudad y zona conurbada. Aunado a esto, el constante crecimiento demográfico y de la mancha urbana, que en las últimas décadas ha venido experimentando la ZMQ, ha propiciado la creación de nuevas rutas y la extensión del recorrido de algunas de las ya existentes, a fin de satisfacer la demanda de la población. En este artículo se presenta un prototipo de Sistema de Información (SI) del STPCU-ZMQ, basado en un modelo computacional de la red conformada por algunas de las rutas más importantes del STPCU-ZMQ.

Palabras clave— Modelación Computacional, Planeación de Itinerarios, Transporte Público, Redes de Transporte.

Introducción

El Sistema de Transporte Público Colectivo Urbano (STPCU o STP) de una ciudad o zona metropolitana está conformado por un conjunto de rutas preestablecidas que recorren la ciudad (o una parte de ella), de forma tal que cualquier punto geográfico que se localice dentro de los límites de la zona metropolitana se encuentre acotado a una distancia máxima predefinida (la cual deberá poder ser recorrida a pie en tan sólo unos cuantos minutos) de al menos un punto por donde pase alguna de las rutas del STP de esa ciudad. Esta descripción de un STP implica que mientras más extensa sea el área que abarque la ciudad, o zona metropolitana, habrá más rutas o las rutas deberán ser más largas. Asimismo, la densidad de población de una determinada zona de la ciudad determinará la cantidad de rutas que pasen por (o cerca de) esa zona, así como la frecuencia de las unidades de transporte que cubren cada una de las rutas. Por otro lado, el conjunto de rutas que conforman un STP debe ser diseñado de manera *ad hoc* a su específica red de tráfico vehicular, la cual puede modelarse apropiadamente mediante un grafo dirigido (dígrafo) ponderado, consistente en un conjunto de vértices (las intersecciones de las calles) y aristas (los tramos de las calles delimitados por dos intersecciones sucesivas), y donde cada arista tiene asociada su longitud y el sentido o sentidos en que el flujo vehicular es permitido en el tramo de la calle representado por la arista (González Gutiérrez et al., 2011). Para modelar adecuadamente la red de tráfico vehicular subyacente a un STP es necesario considerar los diferentes tipos de intersecciones de calles, tomando en cuenta variables como el número de calles que confluyen en un mismo punto de intersección, los sentidos permitidos en cada tramo de calle, así como los retornos y pasos de transferencia al transitar de una calle a otra u otras. En consecuencia, un STP es único para cada ciudad debido a las características particulares de su red de tráfico vehicular y los requerimientos específicos de transporte de personas.

Por ejemplo, los grafos superpuestos sobre los mapas de las Figuras 1 y 2 representan el sentido vial al transitar por la ciudad de Querétaro. Particularmente el grafo de la Figura 2 modela el hecho de que es legal dar vuelta a la

¹ Este material está basado en trabajo realizado gracias al financiamiento del Instituto México Estados Unidos de la Universidad de California (UC MEXUS) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

² El Dr. Arturo González Gutiérrez es Profesor de la Facultad de Informática en la Universidad Autónoma de Querétaro aglez@uaq.mx (autor correspondiente)

³ El Dr. Teofilo F. Gonzalez es Profesor del Departamento de Ciencias de la Computación en la Universidad de California en Santa Barbara, EUA teo@cs.ucsb.edu

⁴ El M.C. Fidel González Gutiérrez es Profesor del Programa Educativo de Ingeniería en Sistemas Computacionales en la Universidad Politécnica de Querétaro fidel.gonzalez@upq.mx

⁵ El M.C. Guillermo Díaz Delgado es Profesor de la Facultad de Informática en la Universidad Autónoma de Querétaro gdiaz@uaq.mx

⁶ La M.C. Ma. Elena Vázquez Huerta es Profesora del Programa Educativo de Ingeniería en Sistemas Computacionales en la Universidad Politécnica de Querétaro elena.vazquez@upq.mx

derecha para tomar la calle de Allende cuando se transita sobre la Avenida Zaragoza de Oriente a Poniente, mientras que no podría dar vuelta hacia la izquierda porque encontraría la calle Allende en sentido contrario, y ni siquiera podría retornar en ese punto de intersección.

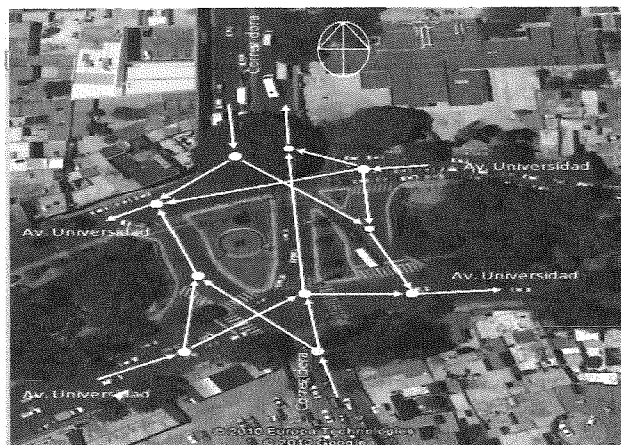


Figura 1. Cruce de Avenidas Universidad y Corregidora de la ciudad de Querétaro.

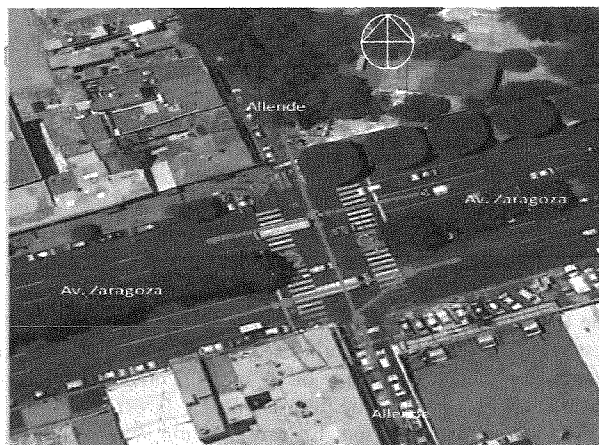


Figura 2. Cruce de Avenida Zaragoza y calle Allende de la ciudad de Querétaro.

Formalmente, sea $G = (V, E, w)$ un digrafo que modela una red de tráfico vehicular consistente en el conjunto V de nodos o vértices, un conjunto E de aristas dirigidas, y una función de peso $w: E \rightarrow \mathbb{R}^+$. Cada arista $e = (a, b)$ del grafo tiene asociado un número real positivo $w(e)$ que representa la longitud de la arista e . Mediante algoritmos eficientes, como el clásico algoritmo de Dijkstra, se pueden calcular rutas óptimas entre dos vértices en la red. El problema entonces consiste en, dado un digrafo G y un vértice origen $s \in V$, encontrar la ruta óptima del vértice s al resto de vértices en la red. El tiempo de ejecución del algoritmo de Dijkstra, usando un arreglo lineal para la cola de prioridad Q , es $O(|V|^2 + |E|) = O(|V|^2)$ o bien $O((|V| + |E|) \log |V|) = O(|E| \log |V|)$ si se implementa la cola de prioridad Q como una estructura de datos *heap* binaria. Más aún, si $|E| = O(|V|)$, entonces el algoritmo se ejecuta en tiempo $O(|V| \log |V|)$, el cual es mejor que $O(|V|^2)$. El algoritmo de Dijkstra asume que todos los pesos de las aristas son números positivos (Sahni, 2004; Cormen et al., 2009) y mantiene un conjunto S de vértices, donde la ruta óptima y su longitud total desde el nodo origen s hasta los vértices $v \in S$ ya han sido determinados. Para todos los vértices $v \in S$, se tiene entonces que $d[v] = \delta(s, v)$, donde $\delta(s, v) = \min\{w(p) | s \rightarrow v\}$ si existe una ruta p de s a v , con una longitud total $w(p)$, de otro modo $\delta(s, v) = \infty$.

El algoritmo Floyd-Warshall (Sahni, 2004) basado en la Programación Dinámica resuelve el problema de las rutas óptimas entre cada par de vértices de la red en un tiempo de ejecución $O(|V|^3)$. Sin embargo, asumiendo que $|E| = O(|V|)$, otra manera más eficiente consiste en utilizar el algoritmo de Dijkstra $|V|$ veces, produciendo las rutas óptimas para cada par de vértices en un tiempo $O(|V||E| \log |V|) = O(|V|^2 \log |V|)$, lo cual es mejor que el tiempo $O(|V|^3)$ que consume el algoritmo basado en programación dinámica.

Modelado de la red de transporte público

Existen por lo menos dos sistemas que responden a *queries* (consultas) de usuarios que requieren información acerca de las rutas del STP que conectan dos puntos geográficos en la ZMQ. Estos sistemas son: (1) El Ruter Online Querétaro (http://www.ruteroonline.com/ruteros/qro/rutas_camiones_queretaro) donde, dado dos puntos, origen y destino, el sistema muestra la descripción y despliega gráficamente los itinerarios que conectan dichos puntos, sin información referente a las longitudes totales de tales opciones de recorrido; (2) El sistema provisto por RedQ (<http://www.redq.gob.mx/content/mapas>), el cual despliega la traza de uno o más itinerarios posibles, cada uno consistiendo de una sola ruta, a través del STP de la ciudad de Querétaro que conectan dos puntos de la ciudad. Sin embargo, si el itinerario consistiese de más de una ruta donde el usuario debiese transbordar por lo menos una vez, el sistema marca como inexistente el servicio. Asimismo, el sistema no ofrece información referente a las longitudes totales de itinerarios. Más aun, ninguno de los dos sistemas mencionados responde a las necesidades del usuario de contar con un ruteo óptimo, es decir aquel itinerario cuya longitud total de recorrido sea la mínima.

En respuesta a las necesidades de transporte público por parte de la población de la creciente Zona Metropolitana de la Ciudad de Querétaro (ZMQ), con el paso del tiempo se ha venido construyendo un complejo

STP, que hasta hace un año consistía de más de 90 rutas, y recientemente se redujo a 66 rutas con la implementación de la Red de Transporte Metropolitano REDQ, que cubre la ZMQ. Sin embargo, a pesar de dicha complejidad, hoy en día no se cuenta con un sistema que permita al usuario del STP utilizarlo de manera informada y eficiente, de modo que se tenga acceso a información básica acerca de los recorridos, horarios, puntos de ascenso y descenso de pasajeros, y todavía de mayor interés, poder conocer el itinerario óptimo que el usuario requiere para transportarse de un punto origen en la ciudad a otro punto destino, a través del STP.

Para lograr la cobertura del STP de la ciudad de Querétaro, varias de las rutas que lo conforman deben intersectarse unas con otras. Sin embargo, el crecimiento de la mancha urbana y de la demanda de transporte, la insuficiente capacidad vehicular de las actuales calles y avenidas de la ciudad, así como la falta de nuevas vialidades, provocan que se presente una superposición excesiva de rutas del STP en algunas calles y avenidas principales, con el resultado indeseado de que esto contribuye al congestionamiento vial (González et al., 2011) y a la contaminación ambiental.

En una primera etapa del proyecto se llevó a cabo el levantamiento de las trazas de un subconjunto de rutas. Para ello se eligieron aquellas cuya longitud total están entre las mayores y atraviesan la ciudad casi de extremo a extremo, conforme a los distintos puntos cardinales, creando propiamente una estrella. Con ello se logra una mayor cobertura con un número mínimo de rutas como se muestra en la Figura 3. Cada recorrido se construyó bajo el ambiente provisto por Google Earth 6.0.1 obteniendo la traza del recorrido como una secuencia de puntos referidos a coordenadas geográficas. Los recorridos están marcados sobre la zona metropolitana de la Ciudad de Querétaro (Escobedo Vega, 2012).

La Tabla 1 muestra las rutas elegidas con un desplazamiento orientado en las direcciones norte a sur, este a oeste, noroeste a sureste y noreste a suroeste, cubriendo así una amplia zona de la ciudad.

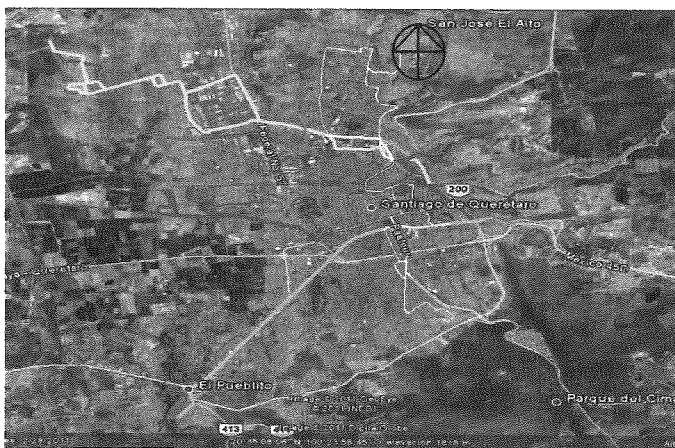


Figura 3. Vista de Google Earth de la zona metropolitana de la ciudad con las rutas seleccionadas del STP

Rutas							
2	7	9	11	38	46	69	X(110)

Tabla 1. Rutas del STP levantadas que constituyen el prototipo

El prototipo del STP de la ciudad de Querétaro se construyó en el ambiente provisto por *Mathematica*, el cual ofrece un lenguaje de programación de alto nivel basado en el paradigma funcional (Trott, 2004; Gaylord y Wellin, 1995; Skiena y Pemmaraju, 2006). El prototipo modela computacionalmente el STP a partir del modelo matemático basado en un digrafo ponderado conexo. *Mathematica* ofrece un conjunto de funciones especializadas que implementan diversos algoritmos de ruteo para calcular las distancias entre cada par de puntos o vértices del grafo. De estas funciones, la función *FindShortestPath* es la mayormente utilizada, la cual genera el itinerario óptimo del usuario del servicio de transporte, que le permite transitar desde un punto origen al punto destino a través de la red. La función tiene la opción de usar el algoritmo de Dijkstra o el algoritmo de Bellman-Ford.

En la Figura 4 se muestran los recorridos de las rutas como una sucesión de puntos, y en la Figura 5, el sentido de las aristas. El grafo consta de 1589 aristas y 1076 vértices. La longitud mínima, máxima y promedio de las aristas es de 20 m, 1018 m y 171.88 m, respectivamente. El grafo posee la propiedad de ser conexo, es decir, para cada par de vértices en el grafo existe un conjunto de aristas que los une. Para nuestro caso particular, existen 1'156,700 de itinerarios óptimos diferentes posibles que unen cada par de vértices. La longitud promedio de los itinerarios óptimos es de 17,527.2 metros. En la Tabla 2 se muestran las longitudes totales de los recorridos completos de las ocho rutas seleccionadas, así como el número de vértices del grafo que pertenecen a cada ruta.

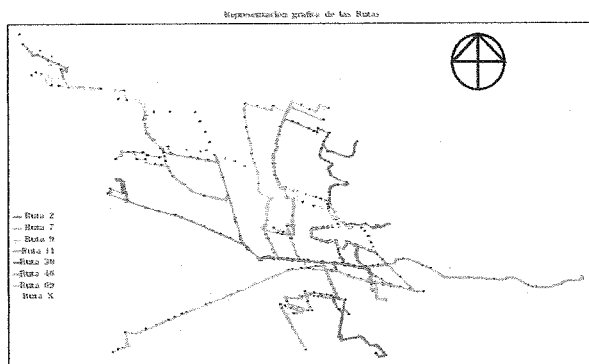


Figura 4. Sucesión de vértices del grafo representando las rutas del STP.

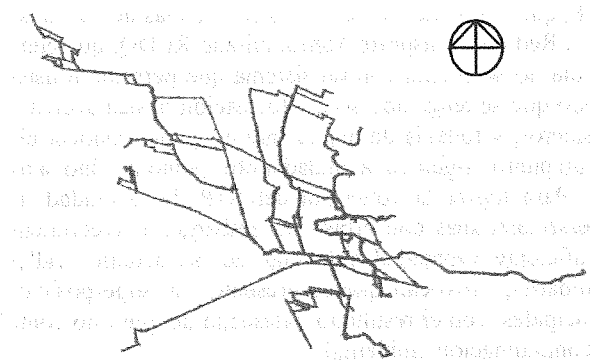


Figura 5. Aristas dirigidas formando ciclos correspondientes a los recorridos de rutas del STP.

En la Figura 6 se presenta el recorrido de un usuario a través del STP desde un punto origen a otro destino; la línea roja representa el itinerario óptimo y cada punto (indicado con diferentes colores) representa un cambio de ruta del usuario.

Ruta	No. de vértices	Longitud total (km)
2	213	39.700
7	162	34.213
9	123	31.568
11	140	38.023
38	126	31.399
46	133	36.315
69	60	25.014
X (110)	134	37.449

Tabla 2. Longitudes totales de cada ruta en el grafo del STP.

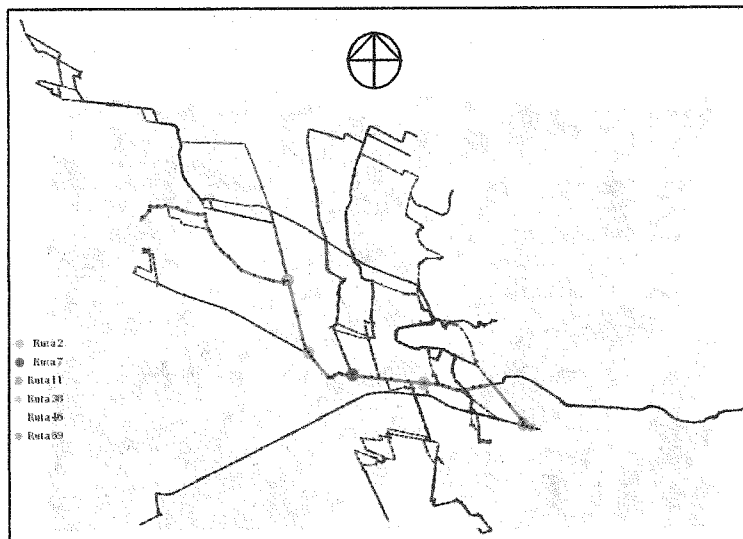


Figura 6. Ruta más corta generada con *FindShortestPath*

Planeación de itinerarios usando el transporte público

Con los resultados obtenidos del prototipo desarrollado en *Mathematica*, se desarrolló un sistema de información basado en web, por medio del cual un usuario puede consultar el itinerario óptimo para transportarse en la ciudad de Querétaro a través del STP, partiendo de un punto origen y arribando a un punto destino. La Figura 7 muestra la interfaz del sistema consiste en dos secciones. Del lado derecho se tiene el mapa de la ciudad de Querétaro desplegado en el ambiente de *Google Maps*. Del lado izquierdo se despliega el itinerario a seguir por el usuario. El usuario marca el punto origen y el punto destino sobre el mapa como datos de entrada, produciendo el itinerario del recorrido que incluye la ruta que puede abordar así como los puntos en donde el usuario debe hacer cambio de ruta para llegar al punto de destino, siguiendo un recorrido óptimo en términos de la mínima longitud total (ver Figura 8).

Los puntos de inicio y destino que selecciona el usuario sobre el mapa usualmente no coinciden con la ubicación de algún vértice del grafo que representa al STP. Para determinar los puntos de arribo y descenso del usuario al STP, se calculan las distancias entre los puntos de origen y destino marcados por el usuario y los vértices del STP, seleccionando aquellos cuya distancia sea la mínima.

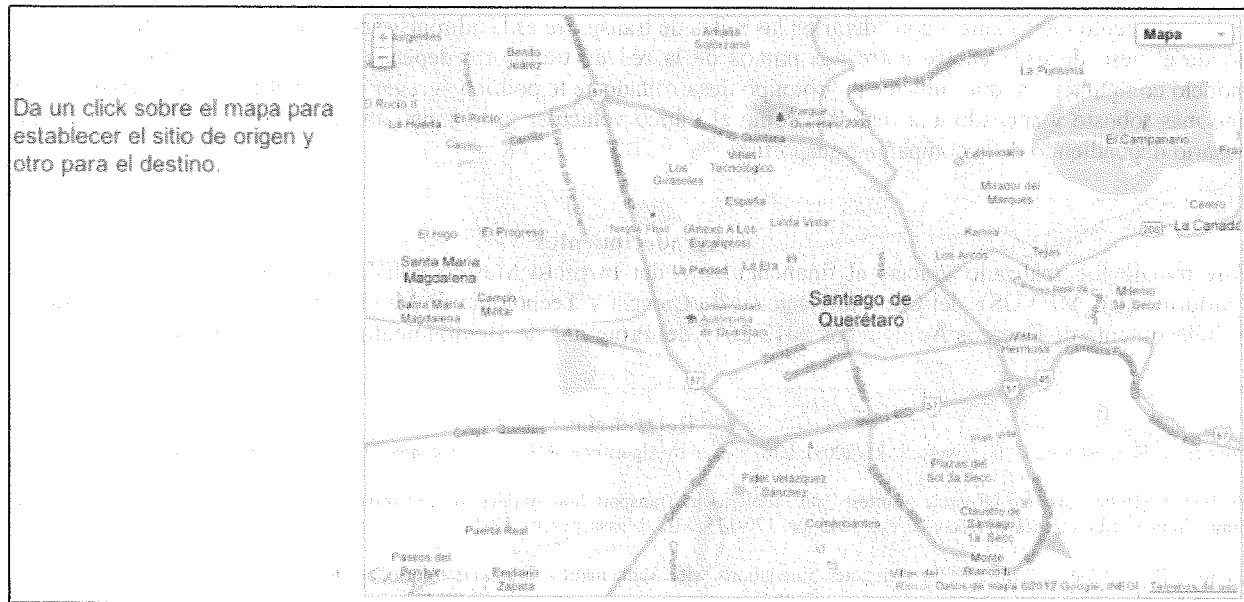


Figura 7. Interface principal del proyecto en web.

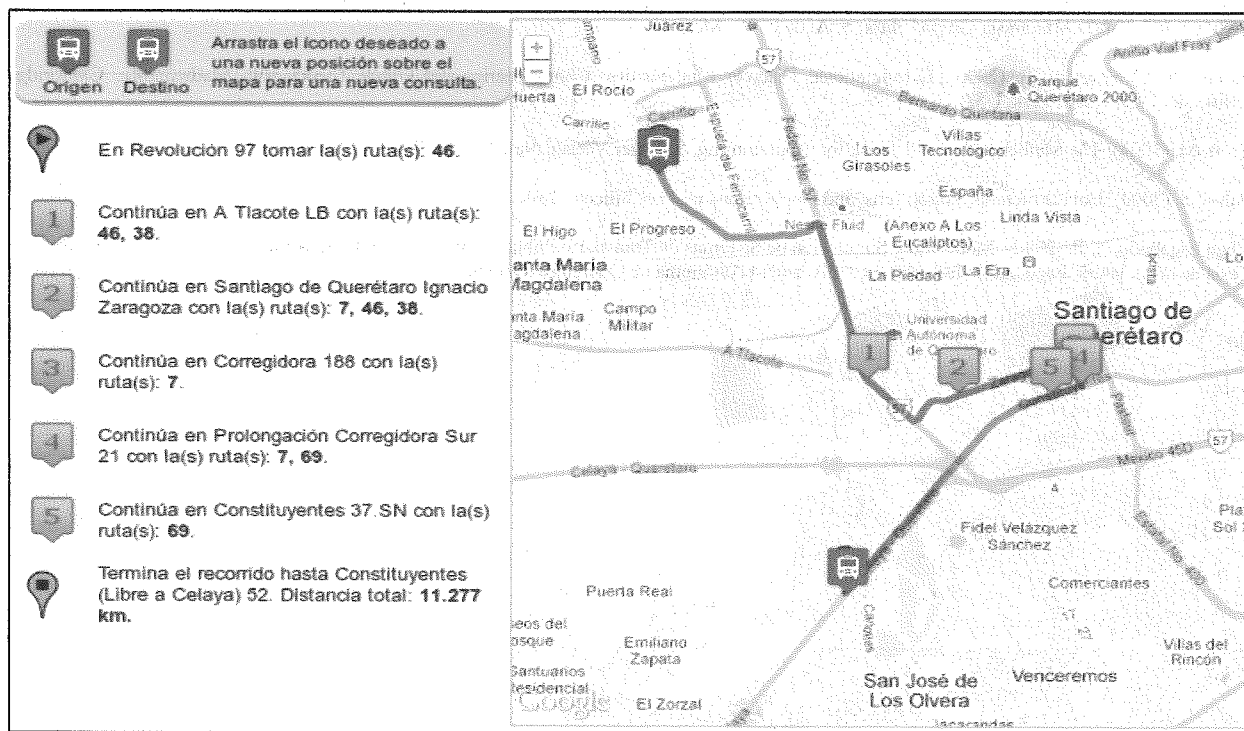


Figura 8. Resultados de una consulta en el prototipo.

Conclusiones

La falta de información acerca de las rutas que conforman el STP de la ZMQ provoca que los usuarios de este servicio inviertan demasiado tiempo para desplazarse de un lugar a otro. Para ayudar a paliar este problema se desarrolló un prototipo de Sistema de Información, basado en un modelo computacional de la red conformada por algunas de sus rutas más importantes. El prototipo permite calcular los recorridos de longitud total mínima que los usuarios debieran usar para trasladarse desde un punto a otro dentro de la ZMQ.

Un concepto interesante a considerar en las redes de transporte es la administración dinámica de dichos sistemas, donde el peso de cada enlace entre dos puntos de la red de transporte depende del tiempo (Chabini, 1998). Al modelo computacional que subyace al prototipo desarrollado se le podrían agregar otras métricas para convertirlo en uno más robusto y apegado a la realidad, como el tráfico vehicular instantáneo, tarifas, calificaciones por parte del usuario dependiendo de la compañía transportista.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento del Instituto México Estados Unidos de la Universidad de California (UC MEXUS), del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) y del Fondo de Fortalecimiento de Cuerpos Académicos 2012-2013 del Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP).

Referencias

- Cormen, T. H.; Leiserson, C. E., Rivest, R. L. (2009). *Introduction to Algorithms*. MIT Press-McGraw Hill. Massachusetts, USA.
- Chabini, I. (1998). *Discrete Dynamic Shortest Path Problems in Transportation Applications: Complexity and Algorithms with Optimal Run Time*. Transportation Research Records, Vol. 1645, pp. 170-175. MIT. Massachusetts, USA.
- Gaylord, R. J., Wellin, P. R. (1995). *Computer Simulations with Mathematica. Explorations in Complex Physical and Biological Systems*. Springer Verlag. New York, USA.
- González Gutiérrez, A., Rangel Mondragón, J., González Gutiérrez, F., Díaz Delgado, G., Huerta Jiménez H. M., Espinosa Chávez, E. I. (2011). *Modelado y simulación de redes de tráfico vehicular (Modeling and simulation of vehicular traffic networks)*. En Gilberto Herrera Ruiz, Ma. Del Carmen Espino Gudiño, Vicente Rodríguez Hernández (Eds.), *Tendencias en Ingeniería, Tecnología y Sociedad* (1a. ed., pp. 223-230). ISBN: 978-607-707-327-7. Alfaomega Grupo Editor, S. A. de C. V., México.
- Skiena, S., Pemmaraju, S. (2006). *Computational Discrete Mathematics: Combinatorics and Graph Theory with Mathematica*. Cambridge University Press. New York, USA.
- Trott, M. (2004). *The Mathematica GuideBook for Programming*. Springer Verlag. New York, USA.
- Sahni, S. (2004). *Data Structures, Algorithms, and Applications in C++*. Silicon Press.
- Vega Escobedo, E. P. (2012). *Modelado y Simulación de Sistemas de Transporte Público: Un caso de Estudio Aplicado a la Ciudad de Querétaro*. Tesis de licenciatura. Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.