

Selección de alternativas de inversión en la construcción de obras viales en la ciudad de México

Selection Among Investment Alternatives for Transportation Infrastructure in Mexico City

Palomas-Molina X.
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
E-mail: xpam@pumas.ii.unam.mx

Álvarez-Icaza L.
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
E-mail: alvar@pumas.ii.unam.mx

(Recibido: octubre de 2007; aceptado: abril de 2010)

Resumen

Se propone un método sistemático con el que se analiza un conjunto de nodos viales de la ciudad de México con altos índices de ocupación para decidir sobre la posible realización de algunos tipos de obras viales en los mismos. El método permite obtener, a través del análisis estadístico de información y de la programación entera, las mejores opciones para invertir en la construcción de estas obras viales bajo un escenario de recursos limitados. La decisión se toma por un lado, con base en los ahorros de tiempo potenciales de las personas que se desplazan por dicho nodo y en el ahorro asociado al costo de los contaminantes que dejarían de emitirse y por el otro lado, considerando el costo de construcción implicado por el tipo de obra necesario. El método puede adaptarse fácilmente a otras ciudades realizando ajustes en los valores estadísticos pertinentes.

Descriptores: obras viales, inversión, programación entera.

Abstract

A systematic method is proposed to analyze, over a given set of high occupancy Mexico City traffic network nodes, the feasibility of different types of infrastructure modifications. This method allows obtaining, based on statistical information and integer programming, the best combination of infrastructure modifications under a scenario of restricted budget. The final choice is based, on one hand, on the savings implied by the reduction of traveling time and pollutants not emitted to the environment and, on the other, on the cost of the specific type of construction involved. The method can be easily adapted to other cities with adjustments to the statistical information.

Keywords: Traffic infrastructure, investment, integer programming

Introducción

En las grandes ciudades el tema del transporte de pasajeros y los problemas inherentes al mismo (tiempos de desplazamiento, contaminación ambiental, pérdida de zonas verdes, etc.) cada día adquieren mayor importancia, debido al crecimiento poblacional. En el caso de la ciudad de México, cada vez que el gobierno toma una decisión para invertir en la construcción de alguna obra de infraestructura para transporte, con excepción quizá del Sistema de Transporte Colectivo “Metro”, ésta es cuestionada por una gran cantidad de ciudadanos, quienes preguntan si será la mejor opción y el por qué se habrá decidido construir una determinada obra en lugar de un puente en un crucero que representa un problema vial desde hace varios años, o bien, el por qué no se mejora el sistema de transporte de autobuses o microbuses, etc.

Aunque la ciudad de México ha contado desde hace varios años con “Planes Maestros” y “Programas Integrales de Transporte y Vialidad” (GDF, 1995 y 2001) estos se modifican periódicamente de acuerdo con conveniencias políticas de los gobernantes y partidos en turno. Con salvedad del plan maestro de la construcción del Metro (ICA, STC Metro, 1977), de acuerdo a lo investigado para la elaboración de este trabajo, no existen formalmente estudios diferentes a los de encuestas origen-destino y de aforos de avenidas que identifiquen qué obra u obras son más convenientes de construir de acuerdo con un presupuesto de capital asignado.

Existen algunos trabajos publicados que estudian la evaluación de proyectos de transporte urbano, en los cuales se analiza, desde el punto de vista económico, la factibilidad de llevar a cabo una obra de transporte (Télez, 1993), (Moreno, 1985). Asimismo, existen otros trabajos que estudian la factibilidad de llevar a cabo alguna obra vial simulando el flujo vehicular de la zona y de las zonas aledañas para valorar la afectación al construir una obra vial en algún nodo o arco en estudio (Lozano *et al.*, 2002 y 2004).

El presente trabajo pretende establecer un criterio de selección de alternativas de inversión para la construcción de obras de infraestructura vial en la ciudad de México aplicando, además de la información tradicional de encuestas origen-destino y de aforos vehiculares, otros datos que indiquen la relación beneficio-costos que brindan diferentes opciones previamente identificadas como puntos viales conflictivos.

Se ha definido un horizonte de estudio de 16 años; del 2004 al 2020, para el cual se han obtenido estadísticamente

las tasas de crecimiento vehicular probables, el crecimiento demográfico por delegación política, la distribución de la población de acuerdo con su ocupación y salario, el salario mínimo y otras estadísticas que permiten un conocimiento de la población y del parque vehicular en los años de estudio. (INGEGI (2004-2005), SCT (2004), GDF STV (1998)).

Con base en los estudios de volúmenes de tránsito registrados en las estaciones maestras permanentes de aforo vehicular en el Distrito Federal y en información del Programa Integral de Transporte y Vialidad 1995 – 2000 y 2001-2005 del Gobierno del Distrito Federal, se han identificado cruceros, vías rápidas y corredores viales que se han catalogado, por su incidencia vehicular, como factibles para llevar a cabo alguna obra de infraestructura vial y han servido como base para obtener estadísticas que han permitido desarrollar la propuesta de un método sistemático para la selección de obras viales que brinden mayores beneficios a la población.

El presente estudio tomará en cuenta exclusivamente la relación beneficio-costos, de acuerdo con una estimación del costo horario promedio de los habitantes que se transportan en diversas zonas de la ciudad en determinados horarios y en diferentes medios de transporte, la valoración que se pueda llevar a cabo del costo asociado a la emisión de contaminantes de los vehículos automotores que circulan por los puntos de estudio y, finalmente, el costo de construcción de la obra asociada.

Para ello, se ha realizado una clasificación de vehículos de acuerdo con su tipo; público, privado y de carga, una clasificación de usuarios de acuerdo con su actividad laboral y nivel de ingresos, se han obtenido datos estadísticos de la afluencia de usuarios en diferentes zonas, así como de curvas de afluencia vehicular en diversos cruceros generando curvas “patrón” de incidencia vehicular. Se consultaron estadísticas de emisión de gases contaminantes por parte de los vehículos automotores para establecer parámetros de valoración económica y se han planteado diversos parámetros para simular objetivamente el funcionamiento de nodos y arcos viales a fin de proponer un método sistemático objetivo y sencillo de operar.

A fin de facilitar el planteamiento y aplicación del método se consideran los análisis a pesos corrientes del año de estudio 2004, ya que, como se trata de comparar entre opciones, el considerar los factores de inflación y de aumento del salario mínimo para la toma de decisiones no influye significativamente por la forma en que se ha planteado del desarrollo del método.

Con los datos obtenidos de los nodos seleccionados se obtienen, mediante el método de programación

entera, las opciones más convenientes dadas ciertas restricciones de presupuesto, principalmente.

El método propuesto se considera un método local, el cual no analiza efectos dinámicos, por ejemplo, el traslado del conflicto vial al momento de realizar una obra a otro punto.

Así mismo, siendo un método basado en estadísticas, puede tener variaciones y actualizaciones de acuerdo con los lugares y tiempos en que se desarrolle el estudio y permite hacer diversos análisis de sensibilidad variando los parámetros que se proponen.

Se pretende establecer un modelo sencillo para que, al ser alimentado con datos actualizados, se obtenga una propuesta de inversión, la cual podrá ser comparada con alguna otra generada con otras consideraciones, o bien, sea el punto de partida de los estudios de inversión.

Así, el método pretende ser una herramienta útil para el personal de las dependencias gubernamentales que toman decisiones, con respecto a la selección de construcción de obras viales en nodos identificados como conflictivos en la ciudad de México y otras zonas urbanas donde se cuente con la información requerida, o bien, para personal de universidades, instituciones o empresas que se dedican al estudio del transporte.

A lo largo del trabajo se presenta una breve descripción de la problemática del transporte en la ciudad de México y su zona conurbada, el planteamiento general del método y sus consideraciones, la descripción operativa del mismo y la realización de un ejemplo utilizando datos reales de 13 nodos en diferentes sitios de la ciudad considerados como factibles para llevar a cabo una obra vial y bajo diferentes escenarios de inversión.

En el ejemplo desarrollado se puede constatar que no necesariamente el cruce con mayor afluencia vehicular o "tráfico" es el que debe ser seleccionado para invertir en una obra vial.

Desarrollo del método

La característica principal del método es que con muy pocos datos (siete) de los nodos viales que se pretende estudiar, resulta muy sencillo y práctico obtener una propuesta de selección de los nodos en los que conviene realizar una obra vial que ayude a solucionar el problema de tráfico vehicular.

Los siete datos de alimentación que requiere el sistema son los siguientes:

- 1) Nombre de las avenidas que conforman el nodo.
- 2) Delegación política en la que se encuentra el nodo.

- 3) Número de carriles que tienen las avenidas que integran el nodo.
- 4) Número de direcciones de las avenidas que integran el nodo (uno ó dos).
- 5) Sentidos de las avenidas que integran el nodo vial (Norte-Sur, Sur-Norte, Oriente-Poniente, Poniente-Oriente).
- 6) Número de fases de los semáforos que controlan el flujo vehicular en las avenidas que integran el nodo.
- 7) Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD), (Cal *et al.*, 1995).

El método considera tres aspectos para realizar la selección de las mejores alternativas de inversión:

- a) El costo de espera por minuto de los usuarios que transitan por un cruce o nodo vial.
- b) El costo asociado a la emisión de cinco de los principales contaminantes generados por los vehículos automotores (Partículas Suspendidas Totales, PST; Dióxido de Azufre, SO₂; Monóxido de Carbono, CO; Óxidos de Nitrógeno, NO_x y Ácido Carbónico, HC) al transitar por un cruce vial.
- c) El costo de construcción de una obra vial que se proponga en el sitio para contribuir a solucionar el problema.

El que los ciudadanos "perdamos" minutos u horas en el desplazamiento a nuestras oficinas, escuelas, negocios, juntas, repartos, etc. y que, en lugar de emplear ese tiempo "perdido" en el cruce de semáforos o tráfico vial, pudiéramos estar desarrollando alguna actividad productiva; representa un costo que puede medirse por el costo asociado al minuto/usuario "perdido" al transitar por dicho nodo o arco vehicular.

Así mismo, la generación de contaminantes por vehículos automotores que transitan por un nodo o arco vial, puede ser valorada mediante un costo asociado a la emisión de dichos contaminantes.

Si bien es cierto que la valoración del costo/minuto de un ciudadano y la de la emisión de contaminantes de cualquier índole, resulta complicada y quizá hasta pudiera decirse que es "subjetiva", el método propuesto pretende establecer parámetros "objetivos" para realizar de forma paramétrica las valoraciones descritas.

En el caso de la valoración de los contaminantes emitidos por los vehículos automotores considera las emisiones registradas por diferentes tipos de vehículos y cuantificadas en gramos generados por vehículo por kilómetro recorrido (g/vehículo-km).

Para realizar una valoración económica de la emisión de contaminantes de los vehículos, se toma como

referencia lo señalado en el Protocolo de Kyoto¹ en relación con el daño que causan los contaminantes al medio ambiente, debido al calentamiento de la atmósfera que produce el efecto invernadero (Potencial de Calentamiento Global, PCG).

Para asignar un costo a la emisión de contaminantes de vehículos automotores, se tomó como base el costo por emisión de CO₂, empleado en Estados Unidos, así como los índices PCG que relacionan al CO₂ con los hidrocarburos y los parámetros que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-041-ECOL-1999 y NOM-042-ECOL-1999, con relación a los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes para vehículos automotores.

Para disminuir el tiempo “perdido” por los ciudadanos en un cruce vehicular y para reducir la generación de contaminantes por parte de los vehículos que transitan por el nodo, se puede llevar a cabo la construcción de alguna obra vial que contribuya a disminuir los tiempos de espera o “colas” que forman los vehículos.

Tomando en cuenta la idea anterior, para el cálculo de los tiempos de espera, el método considera, de acuerdo con la “Teoría de colas” (Moreno, 1991), lo siguiente:

- La población de clientes es infinita y todos los clientes son pacientes.
- A los clientes que llegan primero se les atiende primero.
- La longitud de la fila de espera es ilimitada.
- Los clientes llegan y son servidos de acuerdo con un proceso de Poisson, con una tasa media de llegadas y de servicio λ .
- La distribución del tiempo de llegadas y de servicio es exponencial, con las tasas señaladas.

A partir de estas suposiciones se deducen varias fórmulas para describir las características de operación del sistema:

Utilización promedio del sistema

—

Probabilidad de que n clientes estén en el sistema

$$P_n = (1 - \rho) \rho^n$$

Número promedio de clientes en el sistema de servicio

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

Número promedio de clientes en fila de espera

$$L_q = L - \rho$$

Tiempo promedio transcurrido en el sistema, incluido el servido

$$W = \frac{1}{\lambda - \rho}$$

Tiempo promedio de espera en la fila

$$W_q = W - \frac{1}{\lambda}$$

La tasa media de llegadas λ , corresponde al aforo registrado en VHMD.

Para el cálculo de la tasa media de servicio μ , se considera el tiempo de permanencia en la fila, más el tiempo de servicio que en este caso, lo constituye el tiempo de cruce (Tc) de los vehículos.

Empleando las fórmulas descritas, el método obtiene el tiempo promedio de espera de los vehículos en el Horario de Máxima Demanda (tiempo transcurrido en el sistema) apoyado de algunas otras *consideraciones operativas* como las siguientes:

a) *Tiempo de cruce de vehículos (Tc)*

Es el tiempo promedio que un vehículo tarda en cruzar una avenida de n carriles en un nodo vial. El cálculo se hace tomando una velocidad promedio del vehículo, en este caso se consideró 20km/h y, el ancho de la avenida (3.5m por carril).

b) *Nivel de servicio del nodo (NS) (Cal et al., 1995).*

El nivel de servicio es un parámetro que indica la calidad de flujo vehicular de una vialidad caracterizada por la velocidad operativa, que a su vez, está relacionada con la intensidad. Se identifica con las letras A a la F. Una vialidad con muy buena calidad de flujo será una vialidad con nivel de

¹ El Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático, firmado en la ciudad japonesa de Kyoto en 1998, es un instrumento internacional que pretende reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global, entre ellos, el más importante es el dióxido de carbono (CO₂).
www.conafor.gob.mx/portal/docs/subsecciones/cooperacion/protocolo%20de%20kyoto.pdf

servicio A, mientras una vialidad con muy mala calidad de flujo será nivel F.

c) *Propuesta de polígonos de influencia para los principales corredores de transporte del Distrito Federal*

Esta propuesta es una de las principales aportaciones y consideraciones del método. A raíz de la información obtenida de los aforos y encuestas origen-destino realizadas por el GDF en años anteriores, indicadas en el Programa Integral de Transporte y Vialidad GDF, 1995-2000 y 2001-2006, en los que se identifican 22 principales corredores viales dentro del Distrito Federal y para los cuales se realizaron proyecciones al año 2020, el método, añadiendo 5 corredores más, (Miguel Hidalgo-Cuajimalpa, Tlalpan-Xochimilco, Iztapalapa-Tláhuac, M. Contreras-Tlalpan y Xochimilco-Tláhuac), genera “polígonos de influencia” que sirven de base para obtener parámetros de comportamiento y posible crecimiento de flujo vehicular de cruceros que se deseen estudiar.

De esta manera, se tienen 27 principales corredores viales (arcos) de los cuales, conocemos su afluencia vehicular en el año de estudio y su proyección al

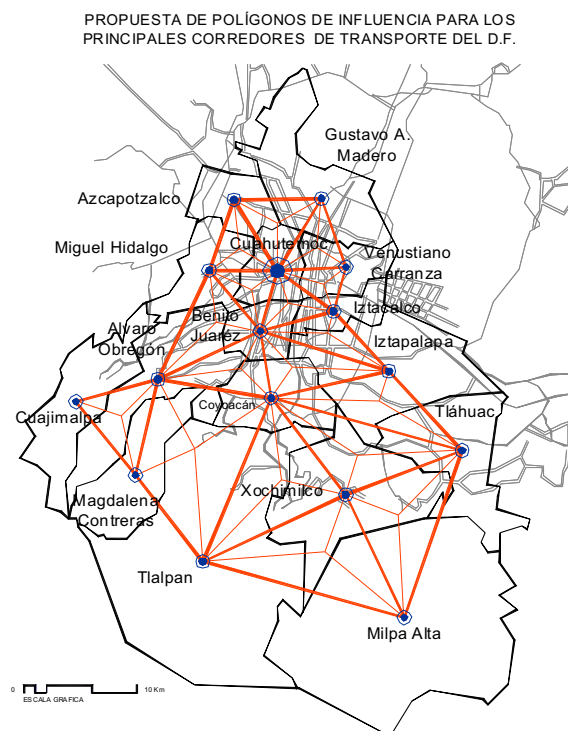
año 2020. Si consideramos una proyección de tipo geométrica podremos suponer la proyección en cualquier año de estudio.

Para asignar un nodo vial a alguno de los 27 arcos viales, se utiliza un método parecido al de *bajada de cargas en Estructuras* (Meli, 1992) o el de *polígonos de Thiessen en Hidrología* (Aparicio, 2001). Así un nodo vial en estudio en la Delegación Coyoacán podrá “asociarse” a los arcos 16, 17, 20, 21 o 22, dependiendo del arco de influencia correspondiente al polígono generado en la figura 1.

Así mismo, con las estadísticas consultadas, se pueden identificar porcentajes de transporte público, particular y de carga que circulan por los 27 principales arcos viales.

d) *Clasificación de nodos y arcos por el porcentaje de vehículos de transporte público de pasajeros y de carga que por él circulan*

Es sabido que el tránsito vehicular se ve afectado por la presencia de camiones de carga y transporte de servicio público de pasajeros. A mayor cantidad de camiones y autobuses en circulación menor velocidad de flujo vehicular y viceversa. Tomando en



Fuente: Propuesta del método

Figura 1. Polígonos de influencia

cuenta lo anterior, el método propone una clasificación de nodos o arcos viales del 1 al 10, dependiendo del porcentaje de camiones de carga y vehículos de transporte público que por él circulen. La clasificación pretende “castigar” con factores de atenuación, dependiendo del tipo de nodo, al flujo vehicular considerado inicialmente en una vialidad o cruceo vial.

e) *Factores de atenuación de flujo vehicular*

El método propone un factor de atenuación a , el cual considera, de acuerdo con el tipo de nodo (porcentaje de vehículos de transporte público y carga), la ubicación del carril de circulación, la atenuación del flujo vehicular debido a las paradas continuas para ascenso y descenso de pasaje del transporte público, la circulación lenta del transporte de carga y vehículos estacionados en carriles derechos, así como las obstrucciones ocasionadas por vehículos que darán vuelta izquierda en el nodo.

f) *Distribución del tipo de usuario de acuerdo con la ubicación del nodo*

Basándose en las estadísticas consultadas, el método propone una clasificación de cuatro tipos de usuario de acuerdo con su nivel de ingresos (Tipo 4, de 0 a 2 salarios mínimos; tipo 3, de 2 a 5 salarios mínimos; tipo 2, de 5 a 10 salarios mínimos y tipo 1, más de 10 salarios mínimos). Así mismo, se obtuvieron los porcentajes por tipo de usuario por entidad política. Tomando en cuenta el salario mínimo vigente al año de estudio y las horas laboradas promedio por cada tipo de usuario, se calcula el costo/minuto por tipo de usuario, el cual servirá como base para calcular el costo de espera asociado al nodo en estudio.

g) *Número de usuarios por tipo de vehículo*

De acuerdo con las estadísticas consultadas se propone un número de usuarios por tipo de transporte: 17 usuarios por transporte público de pasajeros, 1.30 usuarios por transporte de carga y 1.5 usuarios por transporte particular.

h) *Distribución horaria promedio de flujo vehicular considerando el sentido del recorrido*

Con base en las estadísticas consultadas, se obtuvo una gran cantidad de curvas de flujo vehicular

horario en diversos cruceos y vialidades de la ciudad con las cuales se trabajó hasta obtener “curvas patrón” que representarán la distribución horaria de flujo vehicular de cualquier nodo de acuerdo con la dirección y sentido de recorrido.

Considerando el método de la “teoría de colas”, así como los parámetros y planteamientos descritos anteriormente, se obtiene el costo asociado al tiempo de espera de los usuarios de un nodo vial. De esta manera, se pueden estudiar “ n ” nodos viales para obtener sus costos asociados y valorar la oportunidad de construir en ellos alguna obra vial.

A fin de calcular el “beneficio” que se obtendría al construir una obra en algún nodo vial, respecto al ahorro en los costos asociados al tiempo de los usuarios y a la mitigación de la contaminación generada por los vehículos, el método propone factores de atenuación que afectan al nivel de servicio NS considerado originalmente en el nodo en estudio. De esta manera se calculan los costos asociados a cada nodo, con y sin obra vial y, restando dichos costos, se obtiene el “beneficio” que genera la obra propuesta, el cual se buscará que sea el “máximo” apegándose a un presupuesto asignado para la construcción de “ n ” obras viales.

Los factores de atenuación considerados corresponden a valores obtenidos con datos estadísticos proporcionados por personal de la Dirección de Infraestructura de la Dirección General de Obras Públicas del GDF, y con ellos, al igual que con otros de los factores de cálculo propuestos por el método, se pueden llevar a cabo análisis de sensibilidad al variar uno o más de dichos valores.

El método propone que, además de contar con la información del nodo o arco vial en el año de estudio (presente), se tenga información de la situación del mismo nodo en un año de proyección. En este caso, se consideró la proyección al año 2020; es decir, considerando el año de estudio el 2004, una proyección de 16 años para valorar la oportunidad de realizar una obra que quizá se requiera en un futuro próximo. Asimismo, se evalúa la opción de construcción de obras en el promedio de los años de estudio (2004- 2020), con lo cual se tienen tres escenarios distintos de evaluación.

Evidentemente el método, a través de las estadísticas consultadas, considera cierta tendencia de crecimiento y comportamiento de las variables consideradas entre el año de estudio y el año de proyección. Estas tendencias pueden ser modificadas y realizar diversos análisis de sensibilidad que no se abordan en el presente trabajo.

Estimación de los costos de construcción de obras viales

El método propuesto pretende encontrar la obra o conjunto de obras que, de acuerdo con un presupuesto global asignado, representen el mayor beneficio para la población de acuerdo con los dos aspectos considerados; relación beneficio-coste e impacto ambiental.

El método considera la opción de escoger entre dos tipos de obra vial: crucero a nivel o puente vehicular.

Los cruceros a nivel se consideran para nodos con nivel de servicio (NS) entre A y D. Son obras que requieren poca inversión, pueden solucionar eventualmente el conflicto vehicular en algún nodo, pero en la mayoría de los casos, tienen una vida útil bastante limitada.

Por su parte, el puente vehicular resulta ser una obra que requiere una cuantiosa inversión, se considera para nodos con nivel de servicio (NS) entre E y Z, generalmente resuelve el problema de conflicto vial en el nodo y tiene, dependiendo de la zona y del diseño, una vida útil de más de 20 años. El método propuesto, a fin de que el usuario pueda comparar y, en determinado momento, cambiar la obra seleccionada por el método, calcula el costo de ambos tipos de obras. Para el caso del crucero a nivel, se contemplan dos opciones de geometría de obra vial y se seleccionan de acuerdo con la geometría de las avenidas que integran el nodo en estudio.

a) Crucero a nivel (vueltas izquierdas) (Tipo 1)

Opción 1. Crucero a nivel con una vuelta izquierda.

Opción 2. Crucero a nivel con dos vueltas izquierdas.

Para el caso de puente vehicular se contemplan 4 diferentes geometrías y se seleccionan de acuerdo con las características de las avenidas que integran el nodo en estudio.

a) Puente vehicular (Tipo 2)

Opción 1. Puente vehicular recto sin gasas y brazos secundarios.

Opción 2. Puente vehicular recto con una gasa.

Opción 3. Puente vehicular recto con una gasa y un brazo.

Opción 4. Puente vehicular recto con cuatro gasas (trébol).

Para cada una de las opciones de construcción de obras viales el método propone, de acuerdo con un

estudio exhaustivo de costos y de procesos constructivos (GDF DGOP, 2000-2005) un costo por m² de construcción aproximado, el cual servirá para calcular los costos de las obras viales propuestas y poder valorar la oportunidad de su construcción.

Finalmente, considerando la asignación de un presupuesto "Y" para la construcción de obras viales y, mediante el adecuado planteamiento del problema a través de la asignación de variables y de restricciones, con el empleo del método de programación entera se obtiene como resultado la selección de obras que se sugiere realizar de acuerdo con el presupuesto "Y" asignado para tal fin.

Las variables que adquieran el valor "1" son las que, de acuerdo con el planteamiento del problema, constituyen la mejor opción para invertir.

Captura de datos y cálculos del método

Para capturar los datos y calcular los parámetros considerados, el método se apoya en hojas de cálculo del paquete "Excel".

La herramienta adicional a las hojas de cálculo de Excel que utiliza el método, es un paquete de programación lineal que, para la realización del ejemplo comentado, se utilizó el paquete de programación lineal "Tora".

Para mostrar el funcionamiento del método se plantea la realización de un ejemplo considerando 13 nodos viales de diferentes zonas de la ciudad. En el presente artículo se presentan únicamente las tablas de resumen de resultados (tablas 1,2 y 3).

Los nodos seleccionados en el ejemplo son los siguientes:

- 1) Eje 6 sur-Avenida Universidad,
- 2) Copilco-Avenida Universidad,
- 3) Canal de Miramontes-Acoxta,
- 4) Legaria-Periférico,
- 5) Vallejo-Clave,
- 6) Benjamín Franklin-Patriotismo,
- 7) Eje 3 Oriente-Taxqueña,
- 8) Carrillo Puerto-Marina Nacional,
- 9) Avenida de los Insurgentes-Manuel González,
- 10) Río Churubusco-Cuauhtémoc,
- 11) Avenida Tláhuac-San Lorenzo,
- 12) Avenida Desierto de los Leones-Avenida Toluca,
- 13) Rojo Gómez-Eje 6 Sur.

En la realización del ejemplo se consideran dos escenarios de acuerdo con el presupuesto "Y" asignado para la realización de las obras.

Tabla 1. Resumen de costos y beneficios

SIN OBRA

		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13
\$ Tiempo	2004	\$18,886,844	\$72,734,163	\$48,607,594	\$40,595,811	\$35,313,092	\$76,345,788	\$110,641,031	\$114,264,150	\$94,904,289	\$54,477,786	\$5,006,382	\$9,079,173	\$12,963,987
\$ Tiempo	2020	\$490,048,094	\$476,334,290	\$212,219,979	\$60,422,806	\$52,560,007	\$113,633,070	\$346,305,012	\$170,070,761	\$141,417,687	\$75,932,029	\$19,418,714	\$37,944,272	\$43,282,256
\$ Tiempo	2004+2020	\$135,111,151	\$187,076,523	\$100,017,261	\$50,018,099	\$43,509,261	\$94,065,645	\$184,460,444	\$141,181,481	\$117,005,327	\$64,760,690	\$8,767,608	\$18,159,282	\$28,818,036
\$ Contaminaci	2004	\$5,652,017	\$23,279,048	\$17,633,770	\$12,681,849	\$15,617,222	\$23,565,898	\$36,901,730	\$44,622,623	\$35,657,293	\$18,113,908	\$2,514,343	\$3,305,141	\$6,549,232
\$ Contaminaci	2020	\$146,650,234	\$152,453,929	\$76,988,757	\$18,875,664	\$23,244,674	\$35,075,482	\$115,501,942	\$66,416,312	\$53,133,235	\$25,247,461	\$9,752,613	\$13,813,062	\$21,865,612
\$ Contaminaci	2004+2020	\$40,432,934	\$59,875,074	\$36,284,070	\$15,625,306	\$19,241,980	\$29,035,543	\$61,522,470	\$55,134,423	\$43,961,061	\$21,532,982	\$4,403,334	\$6,610,623	\$14,558,483
Sumas \$	2004	\$24,538,861	\$96,013,211	\$66,241,364	\$53,277,660	\$50,930,315	\$99,911,685	\$147,542,761	\$158,886,774	\$130,561,582	\$72,591,693	\$7,520,725	\$12,384,314	\$19,513,219
Sumas \$	2020	\$636,698,328	\$628,788,219	\$289,208,736	\$79,298,469	\$75,804,681	\$148,708,553	\$461,806,955	\$236,487,074	\$194,550,922	\$101,179,490	\$29,171,327	\$51,757,334	\$65,147,868
Sumas \$	2004+2020	\$175,544,085	\$246,951,597	\$136,301,331	\$65,643,405	\$62,751,241	\$123,101,188	\$245,982,914	\$196,315,904	\$160,966,388	\$86,293,672	\$13,170,942	\$24,769,904	\$43,376,519

CON OBRA

		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13
\$ Tiempo	2004	\$7,135,112	\$25,372,675	\$16,956,350	\$14,161,494	\$9,071,760	\$26,632,562	\$38,596,154	\$39,860,228	\$33,106,599	\$19,004,098	\$4,424,329	\$3,167,199	\$8,642,811
\$ Tiempo	2004	\$105,957,566	\$102,992,385	\$63,666,793	\$21,077,968	\$13,502,408	\$39,639,905	\$103,892,701	\$59,327,963	\$49,332,425	\$26,488,222	\$12,946,058	\$11,383,445	\$15,098,728
\$ Tiempo	2004+2020	\$40,533,813	\$56,123,604	\$34,890,180	\$17,448,377	\$11,177,316	\$32,813,979	\$64,347,408	\$49,111,786	\$40,816,369	\$22,591,199	\$7,383,390	\$6,334,724	\$10,052,980
\$ Contaminaci	2004	\$2,135,206	\$8,120,598	\$6,151,315	\$4,423,901	\$3,712,664	\$8,220,662	\$12,872,697	\$15,566,031	\$12,438,591	\$6,318,805	\$2,221,977	\$1,152,956	\$4,366,154
\$ Contaminaci	2020	\$31,708,159	\$32,963,012	\$23,096,627	\$6,584,534	\$5,525,929	\$12,235,633	\$34,650,583	\$23,168,481	\$18,534,849	\$8,807,254	\$6,501,742	\$4,143,919	\$7,627,539
\$ Contaminaci	2004+2020	\$12,129,880	\$17,962,522	\$12,657,234	\$5,450,688	\$4,574,373	\$10,128,678	\$21,461,327	\$19,178,907	\$15,335,254	\$7,511,505	\$3,708,071	\$2,306,031	\$5,078,541
Sumas \$	2004	\$9,270,319	\$33,493,273	\$23,107,665	\$18,585,395	\$12,784,424	\$34,853,224	\$51,468,850	\$55,426,259	\$45,545,190	\$25,322,903	\$6,646,307	\$4,320,155	\$13,008,965
Sumas \$	2020	\$137,665,725	\$135,955,397	\$86,763,420	\$27,662,502	\$19,028,337	\$51,875,538	\$138,543,284	\$82,496,444	\$67,867,274	\$35,295,476	\$19,447,800	\$15,527,364	\$22,726,267
Sumas \$	2004+2020	\$52,663,693	\$74,086,126	\$47,547,414	\$22,899,065	\$15,751,689	\$42,942,657	\$85,808,735	\$68,290,694	\$56,151,623	\$30,102,704	\$11,091,461	\$8,640,755	\$15,131,521

DIFERENCIAS (BENEFICIOS)

		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13
Beneficio	2004	\$15,268,542	\$62,519,938	\$43,133,698	\$34,692,265	\$38,145,891	\$65,058,462	\$96,073,911	\$103,460,515	\$85,016,392	\$47,268,791	\$874,418	\$8,064,159	\$6,504,254
Beneficio	2020	\$499,032,603	\$492,832,822	\$202,445,316	\$51,635,967	\$56,776,344	\$96,833,015	\$323,263,671	\$153,990,630	\$126,683,648	\$65,884,014	\$9,723,528	\$36,229,971	\$42,421,601
Beneficio	2004+2020	\$122,880,392	\$172,865,471	\$88,753,917	\$42,744,340	\$46,999,552	\$80,158,531	\$160,174,179	\$128,025,210	\$104,814,765	\$56,190,968	\$2,079,481	\$16,129,149	\$28,244,998

TIPO Y COSTO DE OBRAS

		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13
Tipo de obra	2004	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1
costo		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$1,989,900	\$9,579,069	\$2,387,880
Tipo de obra	2020	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
costo		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$4,775,760	\$9,579,069	\$44,430,135
Tipo de obra	2004+2020	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
costo		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$2,387,880	\$9,579,069	\$44,430,135

Tabla 2. Planteamiento del problema

Presupuesto asignado:

		Y	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13
2004	Max Z=	\$15,268,542	\$62,519,938	\$43,133,698	\$34,692,265	\$38,145,891	\$65,058,462	\$96,073,911	\$103,460,515	\$85,016,392	\$47,268,791	\$874,418	\$8,064,159	\$6,504,254	
	s.a		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13
		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$1,989,900	\$9,579,069	\$2,387,880	<= Y
		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	= 0,1

Presupuesto asignado:

		Y	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13
2020	Max Z=	\$499,032,603	\$492,832,822	\$202,445,316	\$51,635,967	\$56,776,344	\$96,833,015	\$323,263,671	\$153,990,630	\$126,683,648	\$65,884,014	\$9,723,528	\$36,229,971	\$42,421,601	
	s.a		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13
		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$4,775,760	\$9,579,069	\$44,430,135	<= Y
		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	= 0,1

Presupuesto asignado:

		Y	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13
2004+2020	Max Z=	\$122,880,392	\$172,865,471	\$88,753,917	\$42,744,340	\$46,999,552	\$80,158,531	\$160,174,179	\$128,025,210	\$104,814,765	\$56,190,968	\$2,079,481	\$16,129,149	\$28,244,998	
	s.a		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13
		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$2,387,880	\$9,579,069	\$44,430,135	<= Y
		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	= 0,1

Relación	2004	0.258	1.226	0.329	0.473	0.528	0.768	0.728	0.779	1.337	0.909	0.439	0.842	2.724	
Beneficio/cost	2020	8.441	9.663	1.546	0.705	0.785	1.142	2.451	1.159	1.992	1.267	2.036	3.782	0.955	
	2004+202	2.078	3.389	0.678	0.583	0.650	0.946	1.215	0.964	1.648	1.081	0.871	1.684	0.636	

Tabla 3. Solución

Programación entera															
	Max Z	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	Z
2004															
vial 1	\$500,000	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	\$297,395,000
costos		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$1,989,900	\$9,579,069	\$2,387,880	\$474,302,095
															0.63
vial 2	\$250,000	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	\$225,516,000
costos		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$1,989,900	\$9,579,069	\$2,387,880	\$239,660,531
															0.94
2020															
vial 1	\$500,000	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	\$1,451,032,000
costos		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$4,775,760	\$9,579,069	\$44,430,135	\$460,545,165
															3.15
vial 2	\$250,000	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	\$395,013,000
costos		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$4,775,760	\$9,579,069	\$44,430,135	\$246,499,769
															1.60
2004+2020															
vial 1	\$500,000	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	\$630,424,000
costos		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$2,387,880	\$9,579,069	\$44,430,135	\$474,648,790
															1.33
vial 2	\$250,000	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	\$289,030,000
costos		\$59,122,100	\$51,001,551	\$130,919,738	\$73,277,010	\$72,300,040	\$84,766,270	\$131,883,323	\$132,846,908	\$63,595,173	\$51,984,859	\$2,387,880	\$9,579,069	\$44,430,135	\$248,426,939
															1.16

Escenario 1: Y = 500 millones de pesos.

Escenario 2: Y = 250 millones de pesos.

Para cada escenario de inversión se presenta la selección de alternativas de inversión en construcción de obras viales considerando los tres periodos de estudio (2004, 2020 y 2004+2020).

Las alternativas seleccionadas son aquellas en que las variables "X" adquieren los valores de "1".

Considerando la frecuencia de resultados en los seis escenarios del estudio, los nodos que se recomienda considerar como primera opción para construir la obra vial propuesta son los siguientes:

- Nodo 1 Eje 6 Sur-Avenida Universidad.
- Nodo 2 Eje 10 Sur (Copilco)-Avenida Universidad.
- Nodo 3 Canal de Miramontes-Acoxta.
- Nodo 8 Carrillo Puerto-Marina Nacional.
- Nodo 9 Insurgentes-Manuel González.
- Nodo 10 Avenida Cuauhtémoc-Río Churubusco.
- Nodo 11 Avenida Tláhuac-San Lorenzo.
- Nodo 12 Avenida Desierto de los Leones-Avenida Toluca.

La selección dependerá de los objetivos a corto, mediano o largo plazo de quien o quiénes tomen las decisiones.

Conclusiones

Analizando el desarrollo y aplicación del método propuesto de selección de obras viales a través del ejemplo realizado, se puede concluir que, con los siete datos de alimentación que requiere el método, es factible obtener

de manera objetiva y sencilla una propuesta de las obras viales que conviene construir de acuerdo con el capital asignado para tal fin y se cumple, en buena forma, con el objetivo planteado inicialmente; "ser una herramienta útil para el personal de las dependencias gubernamentales que toman decisiones respecto a la selección de construcción de obras viales en nodos identificados como conflictivos en la ciudad de México, o bien, para personal de universidades, instituciones o empresas que se dedican al estudio del transporte...".

Tomando como base los criterios generales del método, pudieran desarrollarse herramientas similares para evaluar propuestas para la construcción de infraestructura y servicios para el transporte público. Así mismo, el método se puede mejorar para obtener una herramienta general de evaluación de las obras y servicios de transporte requeridos en alguna ciudad.

Referencias

- Aparicio M., F.C. Fundamentos de hidrología de superficie. LIMUSA y Grupo Noriega Editores. México. 2001.
- Cal y Mayor R., Cárdenas J. *Ingeniería de Tránsito*. Séptima edición. Facultad de Ingeniería. Asociación Mexicana de Caminos. 1995.
- Dirección General de Obras Públicas del GDF. *Reportes internos y comunicación personal*. 2000-2005.
- Gobierno del Distrito Federal. *Programa Integral de Transporte y Vialidad del Gobierno del Distrito Federal 1995-2000*. 1995.
- Gobierno del Distrito Federal. *Programa Integral de Transporte y Vialidad del Gobierno del Distrito Federal 2001-2006*. 2001.
- ICA, SCT Metro. *Memoria, Metro de la ciudad de México*. 1977.

- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) (2004 y 2005) [en línea]. Disponible en: www.inegi.gob.mx
- Lozano A., Torres V., Guzmán A., Granados F., Álvarez-Icaza L., Magallanes R., Antún J.P., Luyando G., Vargas F., Argumedo M., Romero E. *Simulación macroscópica del efecto del "Proyecto Segundo Piso de Periférico y Viaducto" sobre el tráfico en la red vial de la Zona Metropolitana del Valle de México-Fase II*. Informe para el Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal y la Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. Convenio UNAM-GDF: 11733-229-13-II-02. Instituto de Ingeniería, UNAM, pp. 125. 2004.
- Lozano A., Granados F., Torres V., Hernández R., Guzmán A., Alarcón R., Vargas F., Guarneros L., Argumedo M., Romero E., Antún J.P., Magallanes R., Álvarez-Icaza L. *Simulación macroscópica del efecto de la "Fase I del proyecto Segundo Piso de Periférico y Viaducto" sobre el tráfico de la red vial de la Zona Metropolitana del Valle de México*. Informe para el Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal y la Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. Convenio UNAM-GDF: 11733-229-13-II-02. Instituto de Ingeniería, UNAM, pp. 171. 2002.
- Meli R. *Manual de diseño estructural*. Primera edición. México. LIMUSA. 1992.
- Moreno-Bonett, A. *Análisis de Inversiones*. Facultad de Ingeniería, UNAM. 1985.
- Moreno-Bonett A. *Apuntes del Curso: Ingeniería de Sistemas III*. Facultad de Ingeniería, UNAM. 1991.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) (2004) [en línea]. Disponible en: www.sct.gob.mx
- Téllez-Sánchez R. *Evaluación de proyectos de infraestructura urbana para el transporte*. DEPM-Facultad de Economía, UNAM. 1993.
- Secretaría de Transporte y Vialidad del GDF. *Volúmenes de tránsito en el Distrito Federal*. Estaciones Maestras (Reporte interno). 1998.

Semblanza de los autores

Xavier Palomas-Molina. Es director de obras externas de la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM. Obtuvo su licenciatura en ingeniería civil y su maestría en ingeniería en el área de investigación de operaciones en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Realizó estudios de posgrado en el área de diseño y construcción de obras viales en la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Sus áreas de especialidad son la planeación y construcción de obras de infraestructura y edificación.

Luis Álvarez-Icaza. Es investigador titular de la Coordinación de Automatización del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Imparte cátedra en la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería y en los posgrados de ingeniería y ciencias de la computación, todos de la UNAM. Obtuvo su licenciatura en ingeniería electromecánica y su maestría en ingeniería en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Cursó sus estudios de doctorado en ingeniería mecánica en la Universidad de California en Berkeley. Sus líneas de investigación se refieren principalmente al control de sistemas no-lineales con aplicaciones al control de tráfico vehicular, control avanzado de vehículos y control de estructuras civiles.